

Paula Finer

Anturielementtikiekon keskityksen monitorointimenetelmä PERIE-laitteistossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Insinöörityö

20.5.2014

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Paula Finer Anturielementtikiekon keskityksen monitorointimenetelmä PERIE-laitteistossa 62 sivua + 5 liitettä 20.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	materiaali ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	prosessikontrolli-insinööri Jani Peltola yliopettaja Kai Laitinen
<p>Insinööriä tehtiin Murata Electronics Oy:lle, joka valmistaa piipohjaisia mikromekaanisia antureita (MEMS). Anturissa oleva elementti valmistetaan piikiekolle, jolle mahtuu tuhansia elementtejä. Työn tavoitteena oli luoda monitorointimenetelmä anturielementtikiekon keskityksen seurantaan PERIE (Plasma Enhanced Reactive Ion Etch) -laitteistossa. Laitteistoa käytetään ohutkalvojen syövyttämiseen piikiekoilta plasman avulla.</p> <p>Työssä luotiin prosessoitava monitorointikiekko ja etsausohjelma PERIE:lle sekä luotettava mittausten menetelmä ja tulosten esittämisjärjestelmä kiekon keskityksen havainnollistamiseksi. Kiekon keskitystä hallinnoidaan PERIE:n robottikäsivarren avulla, jonka liikkeitä on mahdollista muuttaa kahdessa suunnassa: rotate (x-suunta) ja extend (y-suunta). Monitorointimenetelmässä valmis monitorointikiekko, johon on kasvatettu tarvittavat ohutkalvot, etsataan PERIE:llä erityisellä, menetelmää varten luodulla ohjelmalla, jolloin tulokseksi saadaan kiekon reunaa kiertävä reunajäämä. Jäämän korostamiseksi kiekko etsataan vielä puskuroidulla fluorivedyllä, minkä jälkeen selvästi erottuvan reunajäämän leveyttä mitataan kiekon reunalta neljästä pisteestä mikroskoopin ja siihen liitetyn näyttötyökalun avulla. Reunajäämän leveys mitataan kiekon suorareunalta, vasemmalta reunalta, suorareunan vastakkaiselta reunalta ja oikealta reunalta. Jos kiekko on ollut keskellä etsausalustaa, on näkyvän reunajäämän leveys kaikissa mittapisteissä sama. Kiekon keskitys on näin ollen mahdollista selvittää reunajäämien leveyksien perusteella vähentämällä vastakkaitten mittapisteiden reunajäämien leveydet toisistaan. Muodostuneet luvut, joista toinen edustaa keskitystä x-suunnassa (vasen ja oikea reuna) ja toinen y-suunnassa (suorareuna ja sen vastakkainen reuna) asetetaan x-y-koordinaatistoon. Keskitystulokseksi saadaan näin ollen yksi piste koordinaatistossa. Mitä kauempana piste on origosta, sitä kauempana kiekon keskitys on toivotusta tilasta. Kun keskitys tiedetään, on kiekkoa hallinnoivan käsivarren liikeasetuksia mahdollista muuttaa toivottuun suuntaan ja hallitusti, koska keskityksen voi aina tarkistaa menetelmän avulla mahdollisten muutosten jälkeen.</p> <p>Työ rajattiin kattamaan vain menetelmän kehittäminen eikä sen käyttöönottoa otettu mukaan. Työn teoriaosuus käsittelee anturielementtivalmistuksen alkuvaiheiden prosesseja eli ohutkalvojen kasvatusta, ohutkalvojen kuviointia litografisin menetelmin ja ohutkalvojen ja piin syövytystä. Teoriaosuudessa käsitellään myös laatua ja tilastollista prosessin valvontaa.</p>	
Avainsanat	MEMS, PERIE, anturielementtien valmistus, prosessimonitorointi

Author(s) Title Number of Pages Date	Paula Finer Monitoring method for wafer centering in PERIE plasma etcher 62 pages + 5 appendices 20 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials and Surface Treatment Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Jani Peltola, Process Control Engineer Kai Laitinen, Principal Lecturer
<p>This thesis was commissioned by Murata Electronics Oy a company that manufactures silicon-based micro electro mechanical systems (MEMS). The sensing elements in MEMS sensors are constructed on silicon wafers that fit thousands of elements. The purpose of this thesis was to create a monitoring method for wafer centering in PERIE (Plasma Enhanced Reactive Ion Etch) plasma etcher. PERIE is used for etching thin films on silicon wafers using plasma.</p> <p>The monitoring method was created by determining the right monitoring wafer and etching program for PERIE and creating a reliable method for measuring and demonstrating the wafer centering. The wafer centering in PERIE is controlled by PERIE's automatic robot arm and the movements of the arm can be changed in two dimensions: rotate (x-dimension) and extend (y-dimension). In the monitoring method a monitoring wafer with necessary thin films is etched in PERIE with a special program created for this method producing a uniform edge residue on the wafer. To highlight the edge residue the wafer is then etched with buffered hydrogen fluoride after which the width of the clearly visible edge residue is measured from the wafer's edge in four points with a microscope and a screen tool attached to it. The width of the edge residue is measured from the flat edge, the left edge, the edge opposite of the flat edge and the right edge. If the wafer has been in the middle of the etching chuck, the width of the edge residue is the same in all measuring points. The wafer centering is therefore possible to determine by subtracting the measured width values of the opposite measuring points. Then the two values formed where the other represents the centering in x-dimension (left and right edge) and the other in y-dimension (flat and the opposite edge) are set in x-y-coordinate. The centering result of the wafer is therefore a point in a coordinate. The further the point is from the origin the further the centering of the wafer is from the desired state. When the wafer centering is known it is possible to change the settings of the robot arm to the desired state in a controlled manner because the wafer centering is always possible to check after any changes in the robot arm settings are made.</p> <p>This thesis was outlined to creating the monitoring method and the implementation of the method was ruled out. The theoretical part deals with the main front end processes in sensor element manufacturing which are thin film deposition, thin film patterning with lithography process and etching the thin films and silicon. The theoretical part also deals with quality and statistical process control.</p>	
Keywords	MEMS, PERIE, sensor element manufacturing, process control

Alkusanat

Haluan kiittää kaikkia MFI:n työntekijöitä, jotka auttoivat insinööriyön onnistumisessa. Erityiskiitos Jani Peltolalle, joka ohjasi työn tekoa alusta loppuun sekä opetti monia insinöörin työskentelytapoja ja Kenneth Lönnqvistille, joka selvensi PERIE:n rakennetta ja toimintaa ja auttoi muutenkin aina tarvittaessa. Kiitos myös Antti Huhtaselle, joka kärsivällisenä vastaili kaikkiin vaikeisiin kysymyksiin, Jussi Sarkkiselle, joka auttoi menetelmää varten suunnitellun kiekkoalustan toteuttamisessa sekä Janne Partaselle, joka auttoi mittausmenetelmäänalyysin tulosten tarkastelussa. Suuri kiitos myös kaikille operaattoreille, jotka osallistuivat koekiekkojen valmistamiseen sekä tehtyihin analysointitesteihin.

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto	1
2 MEMS-anturielementtien valmistus	2
2.1 Anturi	2
2.2 Mikrosysteemit, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)	2
2.3 Ohutkalvojen kasvatus	2
2.3.1 Kemiallinen kalvonkasvatus	3
2.3.2 Fysikaalinen kalvonkasvatus	3
2.4 Kiekkojen kuviointi litografisin menetelmin	3
2.5 Ohutkalvojen ja piin syövytys	5
2.5.1 Isotrooppinen ja anisotrooppinen syövytys	6
2.5.2 Märkäetsaus	6
2.5.3 Kuivaetsaus	7
3 Prosessin seuranta ja jatkuva parantaminen	9
3.1 Laatu	9
3.2 Prosessin monitorointi	10
3.3 Tilastollinen prosessin valvonta	10
3.4 Mittausmenetelmäänalyysi	11
4 Monitorointimenetelmä kiekon keskitykseen PERIE:llä	12

4.1	Monitorointikiekon määrittäminen ja valmistus	15
4.1.1	Toimenpiteet	15
4.1.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	16
4.2	Monitorointiohjelman määrittäminen	16
4.2.1	Toimenpiteet	17
4.2.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	17
4.3	Mittausmenetelmän määrittäminen	19
4.3.1	Toimenpiteet	20
4.3.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	22
4.4	Kiekkolustan määrittäminen	23
4.4.1	Toimenpiteet	24
4.4.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	24
4.5	Mittausmenetelmän analysointi	30
4.5.1	Toimenpiteet Gage R&R -menetelmässä	30
4.5.2	Toimenpiteet BIAS-menetelmässä	30
4.5.3	Tulokset ja tulosten arviointi toistettavuudesta ja uusittavuudesta	32
4.5.4	Tulokset mittalaitteen poikkeamasta ja tulosten analysointi	36
4.6	Mittaustulosten esittäminen	37
4.6.1	Toimenpiteet	37
4.6.2	Tulokset ja tulosten arviointi	37
4.7	Keskityksen vaihtelu laitteella kammiokohtaisesti	39
4.7.1	Toimenpiteet	40
4.7.2	Tulokset ja tulosten arviointi	40
4.8	Käsivarren liikkeiden säätö	45
4.8.1	Toimenpiteet	47
4.8.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	48
4.9	Käden liikkeiden muuttaminen mittaustulosten perusteella	57
4.9.1	Toimenpiteet	57
4.9.2	Tulokset ja tulosten tarkastelu	58
5	Yhteenveto	61
	Lähteet	62
	Liitteet	
	Liite 1. Monitorointiohjelman määrittämiseen käytetyt prosessiparametrit sekä havainnot testiajoista	
	Liite 2. Mittausohjeet operaattoreille Gage R&R -menetelmän toteuttamista varten	

Liite 3. Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla

Liite 4. Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla

Liite 5. Kiekon keskityksen muuttuminen kun käsivarren liikkeitä hallinnoivia rotate- ja extend-arvoja muutetaan $\pm 500 \mu\text{m}$

Lyhenteet

BIAS	Mittausmenetelmän poikkeamaa tutkiva menetelmä.
GAGE R&R	<i>Repeatability and Reproducibility</i> . Menetelmä, jolla tutkitaan mitausmenetelmän toistettavuutta ja uusittavuutta.
MFI	Murata Electronics Oy. Antureita valmistava yritys Vantaan Martinlaaksossa.
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> . Mikrosysteemit eli komponentit, joissa yhdistyy useita eri toimintoja ja joiden yksittäiset rakenneosat ovat mikrometrin kokoluokkaa.
MSA	<i>Measurement System Analysis</i> . Mittausmenetelmäanalyysi.
PERIE	<i>Plasma Enhanced Reactive Ion Etch</i> . Plasma-avusteinen reaktiivinen ionietsaus.
RIE	<i>Reactive Ion Etch</i> . Reaktiivinen ionietsaus.
SPC	<i>Statistical Process Control</i> . Tilastollinen prosessinhallinta.

1 Johdanto

Murata Electronics Oy (MFI) valmistaa 3D MEMS -antureita, joiden elementit tehdään yksikiteisestä piistä ja lasista. Yritys valmistaa kiihtyvyy-, kallistus- ja kulmanopeusantureita muun muassa auto- ja ilmailuteollisuuteen sekä erilaisiin terveysteknologian sovelluksiin tehtaallaan Vantaan Martinlaaksossa. Anturin tuntoelimet eli anturielementit valmistetaan piikiekoille, joita prosessoidaan puolijohdeteollisuudesta lainattujen periaatteiden mukaan. [1]

Tämän työn tavoitteena oli luoda monitorointimenetelmä anturielementtikiekon keskityksen seurantaan PERIE-laitteistossa. PERIE on automaattinen plasmaetsauslaitteisto, jolla etsataan ohutkalvoja piikiekoilta plasman avulla. Laitteessa on kaksi prosessointikammiota ja se käsittelee kiekkoja robottikäsivarren avulla hakemalla ne latauskammioista ja kuljettamalla ne suuntauskammion kautta jompaankumpaan prosessointikammioon. Prosessin onnistumisen kannalta on tärkeää, että kiekko viedään mahdollisimman keskelle kammion keskellä olevaa syövytysalustaa. Tuotantokiekoista tehtyjen havaintojen perusteella kiekon keskitys kuitenkin vaihtelee ja kiekkojen reunoille jää toisinaan etsaamattomia alueita. Kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä voidaan muuttaa kahdessa suunnassa ja kun tuotantokiekoilla alkaa näkyä etsaamatonta reunaa, säädetään käsivarren liikkeitä näissä suunnissa silmämääräisesti arvioimalla, koska mitään mittausmenetelmää kiekon keskitykseen ei ole olemassa. Kiekon keskitykselle oli siis tarpeellista luoda seurantamenetelmä, jolla kiekon keskitys nähdään ja käsivarren liikkeitä ehditään muuttaa ennen kuin vahinko näkyy tuotantokiekoilla.

Työn teoriaosuudessa kerrotaan lyhyesti anturielementtivalmistuksen alkupään prosesseista ja laadun merkityksestä sekä tilastollisesta prosessin valvonnasta. Työn kohteellinen osuus koostuu prosessoitavan monitorointikiekon määrittämisestä ja luomisesta, käytettävän etsausohjelman määrittämisestä, mittausmenetelmän määrittämisestä ja analysoinnista sekä tulosten esittämismenetelmän määrittämisestä. Työ rajattiin kattamaan vain menetelmän kehittäminen, sillä menetelmän käyttöönotto vie paljon aikaa ja vaatii monia toimenpiteitä, kuten tiedonkeruuta speksi- ja kontrollirajojen määrittämiseksi.

2 MEMS-anturielementtien valmistus

2.1 Anturi

Anturi on mittalaitteen osa, joka reagoi ympäristön muutoksiin ja muuttaa mitattavan suureen sähköiseksi signaaliksi tietokoneella luettavaan muotoon. Antureita käytetään fysikaalisten suureiden mittaamiseen tai kemiallisten yhdisteiden tunnistamiseen. Anturi koostuu tuntoelimestä eli anturielementistä ja vahvistimesta. Tuntoelimen toiminta perustuu johonkin fysikaaliseen tai kemialliseen ilmiöön. Esimerkiksi kapasitiivisessa kiihtyvyyssanturissa tuntoelimen toiminta perustuu kahden pinnan välisen etäisyyden vaihteluun. Kahden pinnan välinen kapasitanssi riippuu niiden etäisyydestä ja päällekkäisen alueen pinta-alasta. Vahvistimen tai lähettimen tehtävä anturissa on muokata tuntoelimeltä saatava signaali tietokoneen ymmärtämään muotoon. [1; 2; 3.]

2.2 Mikrosysteemit, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

Mikrosysteemit (MEMS) ovat komponentteja, joissa yhdistyy useita eri toimintoja ja joiden yksittäiset rakenneosat ovat mikrometrin kokoluokkaa. Kun mikrosysteemit valmistetaan piikiekoille, joiden halkaisija on 150 mm, valmistuu kerralla tuhansia elementtejä. MEMS-teknologian valmistusmenetelmät on lainattu puolijohdeteollisuudelta, minä lisäksi on kehitetty mikrosysteemeille ominaisia teknologioita kuten kiekkoliitokset ja piin syvä kuivasyövytys. Elementtivalmistuksen kolme perusmenetelmää ovat ohutkalvojen kasvatus piikiekoille, ohutkalvojen kuvioiminen ja maskien muodostus litografisesti sekä ohutkalvojen ja piin syövytys. Valmistusprosessissa näitä vaiheita toistetaan, kunnes haluttu rakenne on saavutettu. [1; 4; 5.]

2.3 Ohutkalvojen kasvatus

Yksi MEMS-prosessien peruselementeistä on erilaisten ohutkalvojen kasvatus alustalle. MEMS-prosesseissa kalvonpaksuudet vaihtelevat muutamasta nanometristä satoihin mikrometreihin. Kalvonkasvatusmenetelmät voidaan jakaa kemiallisiin ja fysikaalisiin menetelmiin. Kemialliset kasvatusmenetelmät perustuvat kemialliseen reaktioon, kun taas fysikaalisissa menetelmissä aineet eivät reagoi keskenään, vaan kasvatettava materiaali viedään alustaan mekaanisin tai termodynaamisin keinoin. [6.]

2.3.1 Kemiallinen kalvonkasvatus

Tyypillisiä kemiallisia kasvatusmenetelmiä ovat terminen oksidointi ja erilaiset CVD-prosessit (Chemical Vapor Deposition). Terminen oksidointi on yksi puolijohdeteollisuuden perusmenetelmistä. Se on yksinkertainen menetelmä, jossa piikiekot hapetetaan uunissa. Termisessä oksidoinnissa materiaali viedään hyvin happirikkaaseen ympäristöön ja hapettumista nopeutetaan nostamalla lämpötila 800–1100 °C:seen. CVD-prosessissa pinnoitettava kappale altistetaan yhdelle tai useammalle kaasulle, jotka reagoivat tai hajoavat kappaleen pinnalla muodostaen halutun kalvon. Monet kemikaalit sekä metallit saadaan tyhjiön ja lämmön avulla kaasufaasiin. Höyrystymistä voidaan edelleen tehostaa eri tekniikoilla, kuten plasmalla tai ultraäänellä. Mikrosysteemien valmistuksessa kaksi tärkeintä CVD-prosessia ovat matalapaineinen CVD eli LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ja plasma-avusteinen CVD eli PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). [6; 7.]

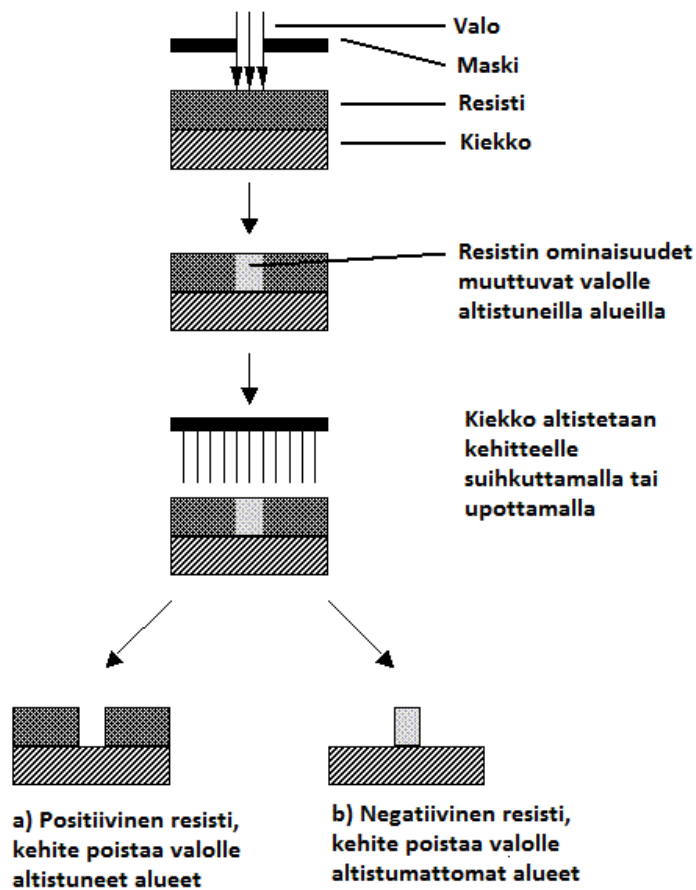
2.3.2 Fysikaalinen kalvonkasvatus

Tyypillisiä fysikaalisia pinnoitusmenetelmiä ovat erilaiset PVD-prosessit (Physical Vapor Deposition), kuten sputterointi ja höyrystys. Niissä materiaali irrotetaan lähteestä ja viedään pinnoitettavalle kappaleelle. Sputteroinnissa pinnoitettava materiaali tuodaan kammioon, jossa on myös pinnoitusmateriaalista tehty kohtio. Kammioon pumpataan alipaine ja sinne tuodaan inerttiä kaasua, kuten argonia. Argon ionisoidaan voimakkaan sähkömagneettisen radiotaajuuskentän (RF-kentän) avulla, joka värähdellessään irrottaa kaasumolekyyleistä elektroneja. Ionit kiihdytetään kentän avulla kohti kohtiota, josta irtoaa atomeja törmäysten johdosta. Atomit siirtyvät tyhjiössä kaikille pinnoille, myös pinnoitettavalle kappaleelle. Myös höyrystyksessä kiekot pinnoitetaan alipaineeseen pumpatussa kammiossa. Kammion pohjalla oleva pinnoitusmateriaali kuumennetaan esimerkiksi elektronisuihkun avulla niin kuumaksi, että se alkaa höyrystymään. Höyrystynyt materiaali, esimerkiksi alumiini, titaani tai kulta, leviää alipaineessa tasaisesti pinnoitettavan kappaleen pinnalle. [6; 8.]

2.4 Kiekkojen kuviointi litografisin menetelmin

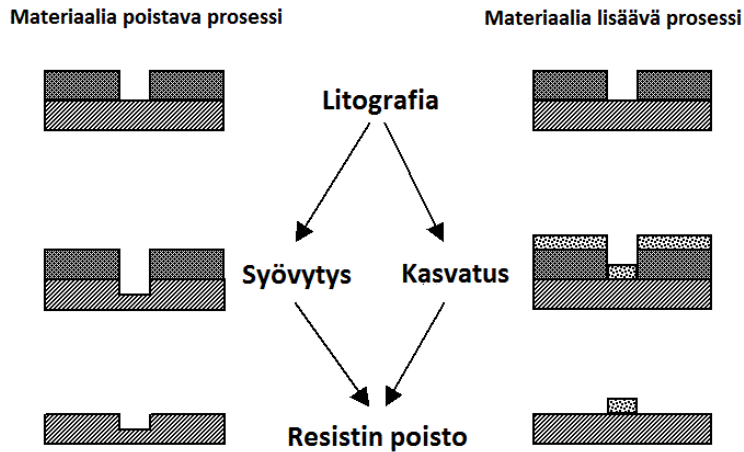
Kun kiekolle on kasvatettu haluttu kalvo, kuvioidaan se litografisin menetelmin. Ensin kiekolle levitetään valoherkkää materiaalia eli resistiä. Resistin levityksen jälkeen kiek-

ko valotetaan kuvioidun maskin läpi ja kehitetään kehitteessä. Kun resisti altistetaan valolle tietyllä aallonpituudella, muuttuu sen resistanssi tiettyä kehitettä kohtaan ja joko valotetut tai valottamattomat osat liukenevat riippuen resististä. Positiivista resistiä käytettäessä valotetut osat liukenevat kehitteessä ja negatiivista resistiä käytettäessä valottamattomat osat. Kuvassa 1 on esitetty valotus- ja kehitysvaiheen periaate yksinkertaisesti. [9.]



Kuva 1. Litografisen prosessin valotus- ja kehitysvaihe. [9.]

Lopuksi resisti kovetetaan lämpökäsittelmällä, minkä jälkeen kiekolla on kuvioitu ja kehitetty resistikalvo, jota voidaan käyttää maskina tiettyjen alueiden syövytyksessä tai uuden ohutkalvon kasvatuksessa. Kuvassa 2 on esitetty litografian merkitys rakenteiden valmistamisessa puolijohdeteollisuuden prosesseissa. [9.]



Kuva 2. Rakenteiden muodostus resistimaskien avulla. [9.]

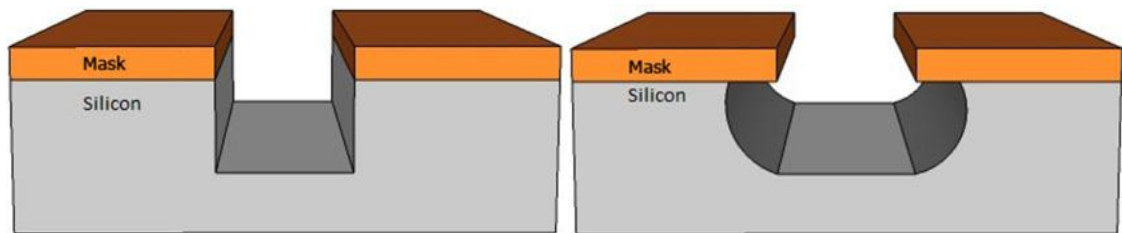
Litografia on tärkein kuvionmuodostusmenetelmä mikrosysteemien valmistuksessa. Resistikalvo toimii hyvin hetkellisenä maskina syövytys- tai kasvatusprosessissa, minkä jälkeen se usein poistetaan. Syövytysprosessissa resisti kestää syövyttävää ainetta paremmin kuin sen alla oleva kalvo, joten alueet, jotka eivät ole resistin peitossa, syöpyvät. Resistsiä käytetään myös kasvatusprosessin apuna. Siinä pinnoitusmateriaali levitetään tasaisesti resistillä kuvioidulle kiekolle, minkä jälkeen resistikalvo poistetaan, jolloin myös resistin päällä oleva materiaali poistuu. Jäljelle jää materiaali, joka ei ollut resistin päällä, vaan resistiin kuvioiduissa aukoissa. Tällä menetelmällä on kuitenkin rajoitteita mikrosysteemien valmistuksessa, sillä resistikalvo ei välttämättä kestä pinnoituksessa käytettäviä lämpötiloja. [9.]

2.5 Ohutkalvojen ja piin syövytys

Mikrosysteemien valmistuksessa ohutkalvojen ja piin syövytys eli etsaus on tärkeässä osassa, jotta haluttuja rakenteita voidaan muodostaa. Etsausprosesseja on kahdenlaisia. Toinen on kuviollista etsausta eli litografisesti muodostettujen etsausmaskien käyttöä, jolloin materiaalia poistetaan kohdista, joita muodostettu maski ei suojaa, ja toinen peitteen etsausta, jossa ei käytetä maskia, vaan kiekolta syövytetään kaikki tai osa koko kiekon peittävästä kalvosta. Etsausmenetelmät voidaan jakaa märkä- ja kuivaetsaukseen. Märkäetsauksessa materiaali syövytetään nestemäisten kemikaalien avulla ja kuivaetsauksessa plasman tai höyrystetyn kemikaalin avulla. Syövytyksen kannalta oleellisia termejä ovat isotropia ja anisotropia. [10, s. 313; 11.]

2.5.1 Isotrooppinen ja anisotrooppinen syövytys

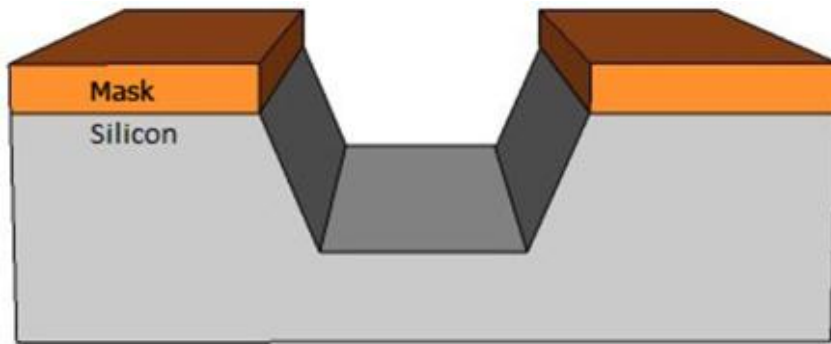
Isotropia tarkoittaa suunnasta riippumatonta. Mikrosysteemien valmistusprosesseissa, kuten etsauksessa isotropia tarkoittaa, että etsaus tapahtuu samalla nopeudella piin kidesuunnasta riippumatta. Isotrooppisen syövytyksen vastakohta on anisotrooppinen syövytys eli suunnasta riippuvainen syövytys. Siinä materiaali syöpyy eri nopeudella kiteen eri suunnissa. Vaakasuunnassa syöpyminen voi olla paljon hitaampaa tai nopeampaa kuin pystysuunnassa syöpyminen riippuen kiteen suuntauksesta etsausmaskiin nähden. Anisotrooppiset syövytysprosessit, joissa syöpyminen on pystysuunnassa nopeaa, mutta vaakasuunnassa todella hidasta, ovat olennaisia prosesseja mikrosysteemien valmistuksessa. Kuvassa 3 on esitetty piin anisotrooppinen ja isotrooppinen etsaus. Täysin anisotrooppisella syövytyksellä saadaan aikaan pystysuoria seinämiä ja isotrooppisella taas pyöreitä seinämiä. [11; 12; 13.]



Kuva 3. Piin a) anisotrooppinen ja b) isotrooppinen etsaus. [12.]

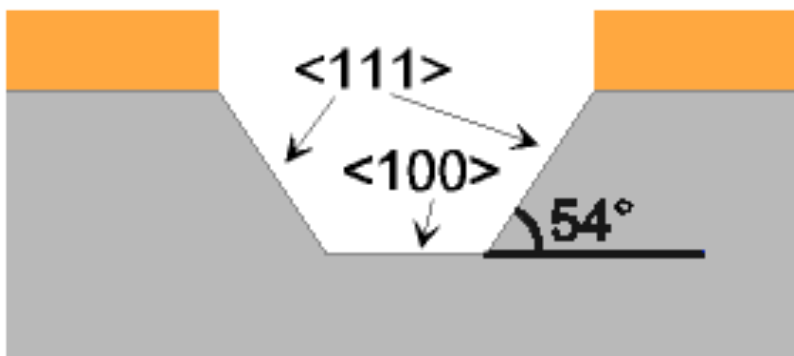
2.5.2 Märkäetsaus

Märkäetsaus on yksinkertainen ja edullinen syövytysmenetelmä, mutta sillä on rajoitteita. Koska yleensä etsauksessa käytetään apuna kuvioitua maskia, täytyy maskin olla sellaista materiaalia, joka ei liukene kemikaaliin tai joka liukenee huomattavasti hitaammin kuin etsattava materiaali. Märkäsyövytteet ovat lisäksi yleensä isotrooppisia, mikä johtaa materiaalin laajaan syöpymiseen maskin alta. Kiteiset materiaalit kuten pii, syöpyvät kuitenkin tiettyjen kemikaalien vaikutuksesta myös anisotrooppisesti. Yksikiteisen piin syövytysnopeudessa on suuria eroja sen kidesuunnasta riippuen. Esimerkiksi kaliumhydroksidilla (KOH) voidaan saavuttaa 400-kertainen syövytysnopeuden ero kiteen $\langle 100 \rangle$ ja $\langle 111 \rangle$ suuntien välillä. Näin puolisuunnikkaan tai V-muotoisten poikkileikkausten muodostaminen mahdollistuu. Kuvassa 4 on esitetty piin anisotrooppinen märkäetsaus.



Kuva 4. Piin anisotrooppinen märkäetsaus. [12.]

Kuvassa 5 on esitetty piin kidesuunnat $\langle 100 \rangle$ ja $\langle 111 \rangle$ ja anisotrooppisen märkäetsauksen sivuprofiili.



Kuva 5. Piin kidesuunnat $\langle 111 \rangle$ ja $\langle 100 \rangle$ anisotrooppisessa märkäetsauksessa. [14.]

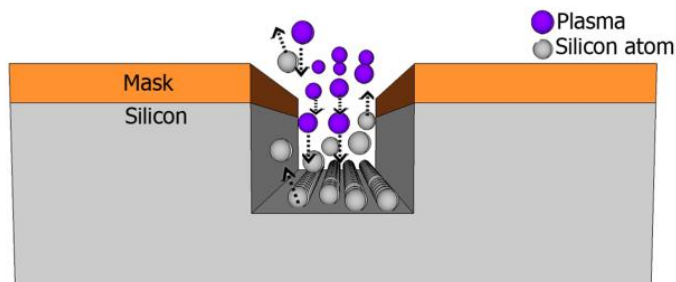
Märkäetsauksella ei kuitenkaan saada piihin suoria rakenteita ja näin ollen elementtien valmistuksessa käytetään myös monimutkaisempia ja kalliimpia, mutta täysin anisotrooppisen syövytyksen mahdollistavia kuivaetsausmenetelmiä. [11; 12; 14; 15.]

2.5.3 Kuivaetsaus

Kuiva- eli plasmaetsaus perustuu plasman käyttöön materiaalin syövytyksessä. Plasma on aineen olomuoto, jossa atomit ovat menettäneet elektroneja. Syövytys tapahtuu etsauskammiossa, jossa kaasuseoksesta muodostetaan plasmaa voimakkaan radio- taajuuksilla vaihtelevan sähkökentän avulla. Kammiossa olevaan kiekkoalustaan kohdistetaan voimakas sähkömagneettinen radiotaajuuskenttä, joka on taajuudeltaan normaalisti 13,56 MHz. Värähtelevä sähkökenttä ionisoi kaasun molekyylit irrottamalla niistä elektroneja, joten plasma muodostuu elektroneista ja positiivisista ioneista. Kui-

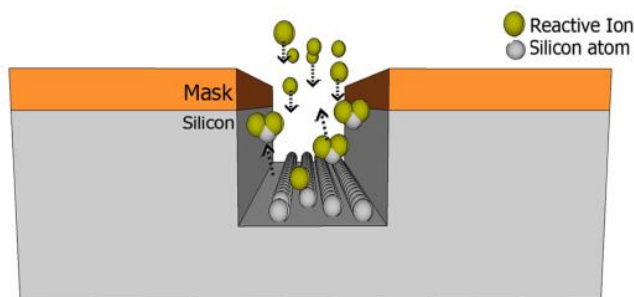
vaetsaustekniikat voidaan yleisesti jakaa kolmeen eri luokkaan: fysikaaliseen kuivaet-
saukseen, kemialliseen kuivaetsaukseen ja reaktiiviseen ionietsaukseen (RIE, Reactive
Ion Etching).

Fysikaalinen kuivaetsaus perustuu materiaalin pommittamiseen ioneilla, elektroneilla
tai fotoneilla. Kemiallista reaktiota ei tapahdu, vaan materiaalin atomit irtoavat kiihdytet-
tyjen partikkeleiden törmätessä niihin suurella nopeudella. Kuvassa 6 on esitetty fysi-
kaalisen kuivaetsauksen periaate.



Kuva 6. Fysikaalinen kuivaetsaus. [12.]

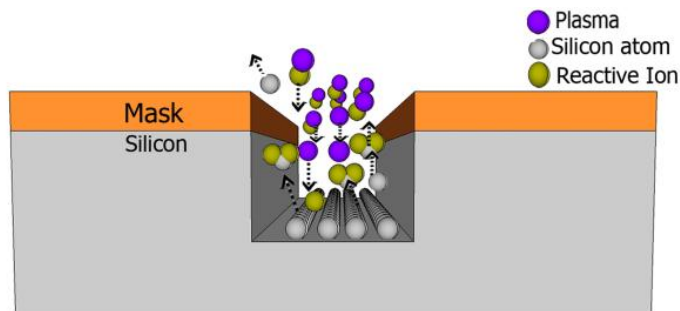
Kemiallisessa kuivaetsauksessa materiaalia syövytetään kemiallisen reaktion avulla.
Menetelmässä ei käytetä nestemäisiä kemikaaleja, vaan syövyttäviä kaasuja. Tyypilli-
siä puolijohdeteollisuudessa käytettäviä kaasuja ovat tetrafluorimetaani (CF_4), rikkihek-
safluoridi (SF_6), typpifluoridi (NF_3) ja kloorikaasu (Cl_2). Kuvassa 7 on esitetty kemialli-
sen kuivaetsauksen periaate.



Kuva 7. Kemiallinen kuivaetsaus. [12.]

RIE:ssa eli reaktiivisessa ionietsauksessa yhdistetään fysikaalisen ja kemiallisen etsa-
uksen periaatteet. Se eroaa fysikaalisesta etsauksesta siten, että siinä syövytettävää
materiaalia pommitetaan myös reaktiivisilla ioneilla. Tyypillisiä RIE-kaasuja pitää syövy-

tettäessä ovat tetrafluorimetaani (CF_4) ja rikkiheksafluoridi (SF_6). Kuvassa 8 on esitetty reaktiivisen ionietsauksen periaate. Koska menetelmä käyttää niin fyysistä kuin kemiallistakin syövytystä, on se huomattavasti nopeampi syövytysmenetelmä kuin fysikaalinen tai kemiallinen menetelmä yksinään. Prosessi on yksi monipuolisimmista ja yleisimmin käytössä olevista menetelmistä mikrosysteemien valmistuksessa ja tutkimuksessa. [11; 12; 16.]



Kuva 8. Reaktiivinen ionietsaus. [12.]

3 Prosessin seuranta ja jatkuva parantaminen

3.1 Laatu

Laatu on yksi merkittävimmistä tekijöistä kaikissa tuotantoprosesseissa. Laadun ymmärtäminen ja jatkuva parantaminen ovat avaintekijöitä yrityksen menestyksen, kasvun ja kilpailukyvyn kannalta. Laadulle ei kuitenkaan ole olemassa yleispätevää määritelmää tai mittausmenetelmää. Laatu onkin hyvin usein henkilökohtainen ja tilanneriippuvainen käsite. Myyjän kannalta oleellista on laatumaine, ostajan kannalta taas käytön aikainen laatu ja yhteiskunnan kannalta ratkaisevaa on tuotteen koko elinkaaren muodostama kokonaisvaikutus.

Tuotteen laatu voidaan todentaa erilaisia mittareita ja mielikuvia hyödyntäen. Tuotteen laatukäsite voidaan jakaa suunniteltuun laatuun ja toteutettuun laatuun. Suunniteltu laatu määrittelee, kuinka käyttötarkoitukseen sopivaksi tuote on suunniteltu eli kuinka hyvin se vastaa käyttäjän sille asettamia vaatimuksia. Siihen vaikuttavat muun muassa tuotantomateriaalit, komponenttien ominaisuudet ja tuotteen koko. Toteutettu laatu taas määrittelee, kuinka hyvin valmis tuote vastaa suunnittelun asettamat laatuvaatimukset.

Siihen vaikuttavat muun muassa tuotantoprosessi, laitteiden suorituskky ja työntekijöiden osaaminen.

Prosessin laatua voidaan arvioida vaihtelun perusteella. Mitä vähemmän prosessissa ja näin ollen myös tuotteissa on vaihtelua, sitä laadukkaampi prosessi on. Vaihtelua vähentämällä vähennetään myös hylättävien tai uudelleen prosessoitavien tuotteiden määrää, joten myös kustannustehokkuus paranee. [17, s. 17; 18, s. 35–36]

3.2 Prosessin monitorointi

Prosessin monitorointi on osa kunnossapitotoimintaa ja sillä tarkoitetaan prosessin eri osien jatkuvaa tarkkailua, seuranta ja kunnonvalvontaa. Prosessimonitoroinnin ansiosta prosessissa ilmenevät ongelmat havaitaan ennen kuin tuotteet tai laitteet vikaantuvat tai halutut toiminnot estyvät. Monitorointi vaikuttaa prosessin ja tuotteen laatuun sekä työturvallisuuteen. Myös taloudelliset hyödyt kasvavat sitä mukaa kuin prosessit monimutkaistuvat.

Tuotantoprosessin monitorointijärjestelmä koostuu monista erilaisista toimenpiteistä, laitteista ja mittausmenetelmistä. Käytettävät työkalut voidaan yleisesti jakaa kahteen luokkaan: niihin, jotka tarkkailevat tuotteiden tilaa, ja niihin, jotka tarkkailevat tuotteita prosessoivien laitteiden tilaa. Käyttöseuranta suorittavat yleensä operaattorit eli kohteiden käyttäjät normaalin tuotannon ohella. Kunnonvalvonnan mittaukset voivat olla joko määrääjain suoritettavia tai automaattisia ja jatkuvia.

Kun luodaan uutta kunnonvalvontajärjestelmää, valitaan kohteen tilaa parhaiten kuvaavat tunnusuurat, joille määritetään mittauksen suoritustaajuudet sekä hälytysrajat. Mittauksille luodaan suoritustajärjestelmä, tulosten taltiointi- ja tulkintajärjestelmä sekä toteutusjärjestelmä mittauksien vaatimille toimenpiteille. [17, s. 82–83; 19, s. 54, 56, 58]

3.3 Tilastollinen prosessin valvonta

Tilastollista prosessin valvontaa käytetään erityisesti sarjatuotannossa ja se perustuu mitattavien tuote- tai laiteominaisuuksien tilastolliseen analyysiin. Tilastotiede tutkii ti-

lastojen keräämistä, käsittelyä ja tilastoista tehtäviä johtopäätöksiä. Tilastollinen päätöksenteko perustuu tilastojen oikeaan yleistämiseen ja epävarmuuden määrittämiseen. Tilastollisia menetelmiä ovat menetelmät, joissa havaintoja käsitellään joukkona, eikä päätöksiä tehdä yksittäisten havaintojen perusteella. Käytännössä muotoutuneesta ja vakiintuneesta tavasta toteuttaa prosessin laadunvalvontaa tilastollisia menetelmiä soveltaen käytetään nimitystä SPC (Statistical Process Control). Laajasti tulkittuna SPC kattaa kaikki menetelmät, joilla saadaan tilastollista pohjaa päätösten tekemiselle.

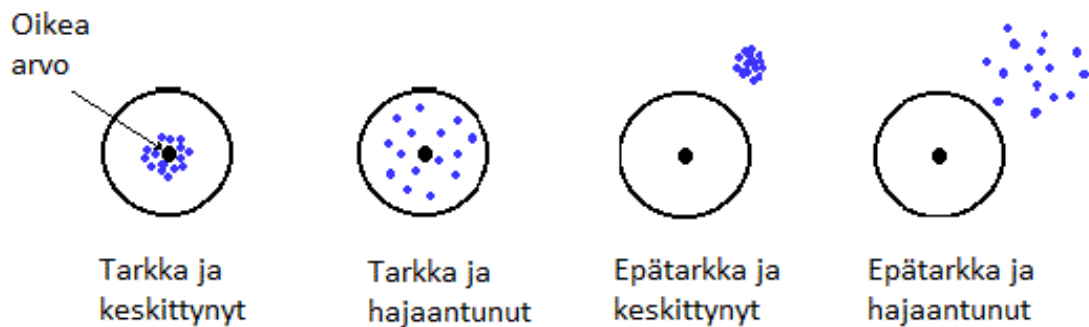
Tilastollisten työkalujen avulla on mahdollista tehdä luotettavia ja todistettavia johtopäätöksiä tutkittavasta asiasta. Tilastollisen laadunvalvonnan toteutus suunnitellaan aina tapauskohtaisesti, sillä tuotanto voi olla hyvin erilaista. Esimerkiksi erävalmistuksessa kunnonvalvonta suoritetaan usein ottamalla jokaisesta erästä edustava näyte, kun taas jatkuvassa valmistusprosessissa edustava näyte otetaan säännöllisin väliajoin.

Prosessin laatua eli suorituskkyä kuvataan vertaamalla prosessin keskimääräistä suoritusta tuotteiden spesifikaatioiden asettamiin vaatimuksiin. Suorituskyky on määritettävä tilastollisesti luotettavalla tavalla käytettävissä olevista havainnoista. Havainnot voivat olla hyvin erilaisia. Niitä voidaan tehdä valmistuvista tuotteista ja niiden ominaisuuksista kuten mitoista tai sitten jostain näkymättömästä, mutta prosessin vaihtelua hyvin kuvaavasta suuresta, kuten valmistumisajasta tai energiankulutuksesta. Prosessin nykyhetkeä kuvaavien havaintojen keskiarvoa ja vaihtelua verrataan prosessin pitkän aikavälin keskiarvoon ja vaihteluun. Havainnoinnin analysoinnissa ja kuvaamisessa käytetään apuna tilastollisia ohjelmia ja valvontakortteja. Valvontakortit ovat graafisia apuvälineitä prosessista mitattujen suureiden esittämiseksi. [18, s. 165–168; 19, s. 128]

3.4 Mittausmenetelmäanalyysi

SPC perustuu prosessista *mitattavien* ominaisuuksien keskiarvon ja vaihtelun seurantaan. Mittaus on kuitenkin siitä ongelmallinen menetelmä, että myös siinä on aina vaihtelua, jolloin on vaikeaa sanoa, johtuvatko havaitut muutokset prosessista vai mittauksesta. Mittausmenetelmäanalyysi, MSA (Measurement Systems Analysis) on analyysi, jonka avulla tutkitaan mittausjärjestelmän (mittalaite, mittaaja, menetelmä jne.) aiheuttamaa virhettä ja vaihtelua tuloksiin. Vaihtelu voidaan jakaa tulosten hajonnan paikkaa kuvaaviin ja tulosten hajonnan leveyttä kuvaaviin tekijöihin. Nämä tekijät kertovat mit-

tauksen tarkkuudesta ja keskittyneisyydestä. Kuvassa 9 on esitetty tarkkuuden ja keskittyneisyyden ero.



Kuva 9. Tarkkuus ja keskittyneisyys mittauksissa. [21.]

3.5 Paikkaa eli tarkkuutta kuvaavia tekijöitä ovat poikkeama (bias), lineaarisuus ja stabiilisuus. Poikkeama eli bias kertoo, kuinka paljon mitattu arvo poikkeaa todellisesta arvosta, lineaarisuus taas kertoo, kuinka vakaana tämä poikkeama pysyy mittausarvon muuttuessa, ja stabiilisuus kertoo, kuinka vakaana mittaustulos pysyy ajan kuluessa. Leveyttä eli keskittyneisyyttä kuvaavia tekijöitä ovat toistettavuus, uusittavuus ja kokonaisvaihtelu. Toistettavuus kuvaa mittalaitteesta aiheutuvaa vaihtelua ja uusittavuus mittaajasta aiheutuvaa vaihtelua. Leveyttä kuvaavia tekijöitä tutkitaan Gage R&R (Repeatability and Reproducibility) -menetelmän avulla, jossa mittaus toistetaan esimerkiksi kolmella operaattorilla satunnaisessa järjestyksessä useita kertoja. Mittauksista saadut tulokset analysoidaan tilastollisesti, jolloin nähdään, onko mittaus toistettava ja uusittava, ja jos ei, mistä hajonta johtuu. [20; 21.]

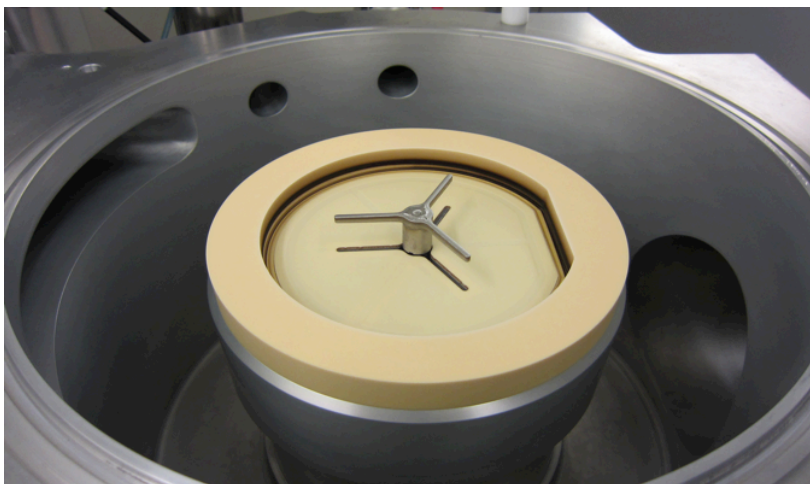
4 Monitorointimenetelmä kiekon keskitykseen PERIE:llä

PERIE-laitteistoa (Plasma Enhanced Reactive Ion Etching) käytetään MFI:llä piioksidin ja -nitridin sekä DLC:n etsaamiseen. PERIE on ICP-RIE laite, joten se käyttää kahta tehonlähdettä (ICP + CCP) plasman muodostamiseen. ICP on induktiivisesti kytketty plasmalähde, jonka aikaansaama voimakas radiotaajuuskenttä ionisoi, virittää ja hajottaa reaktiokaasujen molekyylejä ja atomeja. Sillä saadaan aikaan plasman korkea radikaali- ja ionitiheys. Kentän taajuus on yleensä 13,56 MHz. CCP on kapasitiivisesti kytketty plasmalähde, jolla ohjataan plasmassa olevat ionit ja radikaalit etsättävän koh-

teen pintaan. Sen tehoa säätämällä hallitaan ionipommituksen voimakkuutta. Prosessikammion paine on tyypillisesti 100–1000 Pa ja kaasuvirtaus voi nousta enimmillään arvoon 10 sccm (standardikuutiosenttimetriä minuutissa). [22.]

MFI:n PERIE-laitteistossa on neljä kammiota: kiekon lataus- ja suuntauskammio sekä kaksi prosessointikammiota. Prosessointikammiot ovat pyöreitä ja niiden keskellä on kiekkoalusta, jossa kiekko lepää syövytyksen ajan. Kiekkoalusta on sähköisesti eristetty muusta kammioista. Prosessikaasut tuodaan kammioon katossa olevista suuttimista, ja syntyvät reaktiotuotteet poistetaan alakautta.

PERIE-laitteistossa kiekko viedään etsauskammioon käsivarren avulla. Aluksi kiekkoa kuljettava käsivarsi hakee prosessoitavan kiekon latauskammioista ja vie sen keskityskammioon, jossa kiekko suunnataan oikein. Kun suuntaus on hoidettu, hakee käsivarsi kiekon keskityskammioista ja vie sen etsauskammioon. Käsivarsi pysähtyy etsauskammion keskellä olevan kiekkoalustan yläpuolelle. Kiekkoalustan keskeltä nousee niin sanottu kiekkokäpälä, joka nostaa kiekon käsivarrelta. Käsivarsi poistuu kammioista ja kiekkokäpälä kiekkoineen laskeutuu ja kiekko jää keskelle kiekkoalustaa. Kuvassa 10 on esitetty PERIE:n toinen etsauskammio ja -alusta sekä alustan keskeltä nouseva kiekkokäpälä.



Kuva 10. Toinen PERIE:n etsauskammioista ja etsausalustan keskeltä nouseva ”kiekkokäpälä”.

MFI:llä alustaa ympäröi niin sanottu uniformity ring. Kun kiekko on keskellä alustaa, jää kiekon ja uniformity ringin väliin noin 1,5 mm. Kuvassa 11 on esitetty piikiekko keskellä etsausalustaa.



Kuva 11. Piikiekkokeskellä etsausalustaa.

Kiekkokeskitykseen ei tällä hetkellä ole olemassa mitään seurantamenetelmää. Normaalisti keskityksellä ei ole niin väliä, sillä kiekko etsaantuu tasaisesti joka puolelta. MFI:llä kiekkoalustaa ympäröi kuitenkin mainittu uniformity ring, joka estää maskioksi-dietsauksissa esiintyviä läpilyöntejä, mutta hidastaa etsausta kiekon reunoilla. Tuotantoresepteissä tätä ilmiötä vähennetään ylietsaamalla eli jatkamalla etsaamista vielä hieman sen jälkeen, kun "end point" on löytynyt eli etsattava kalvo on loppunut kiekolta. Joskus tämä ei kuitenkaan riitä ja kiekkoilla esiintyy jäämää jollakin reunalla. Tällöin kiekko ei ole ollut keskellä kammiota, vaan liian lähellä uniformity ringiä siellä, missä jäämää esiintyy. Reunajäämien takia kiekkot pysäytetään tuotannossa poikkeavana tuotteena lisätutkimuksia ja/tai lisäprosessointia varten, mikä hidastaa kiekkojen läpimenoaikaa ja huonontaa laatua.

Kiekkokeskitystä ei ole mahdollista selvittää tuotantokiekkoilla, joten tavoitteena oli luoda seurantamenetelmä, jossa käytetään erillisiä monitorointikiekkoja. Monitorointikiekkot ovat testikiekkoja, joita käytetään erilaisten seurantatoimenpiteiden tekemiseen silloin, kun seuranta ei voida tehdä tuotantokiekkoja tutkimalla. Monitorointikiekkoja käytetään yleisesti laitteiden tilaa kuvaavissa seurannoissa. Monitorointi toteutetaan tuotannon ohella tasaisin määräajoin, joten monitorointikiekkojen tuotanto ja itse monitorointitoimenpiteiden suorittaminen pitäisi sujua mahdollisimman helposti tuotantoa liikaa häiritsemättä. Tässä työssä tavoitteena oli luoda monitorointikiekko, joka etsataan PE-RIE:llä sellaisella ohjelmalla, joka jättää kiekon reunalle tasaisen ja mitattavissa olevan

kaistaleen. Kiekon keskitys on näin mahdollista selvittää oikean mittausmenetelmän ja mittausten analysointimenetelmän avulla.

4.1 Monitorointikiekon määrittäminen ja valmistus

Pohjana monitorointikiekolle käytettiin normaalia tuotannossa käytettävää testikiekkomateriaalia, joka on valmistettu puhtaasta yksikiteisestä piistä. Koekiekoille oli mahdollista kasvattaa eripaksuisia oksidi- ja nitridikerroksia. Jotta tulevien monitorointikiekkojen tuottaminen onnistuisi sujuvasti normaalin tuotannon ohella, valittiin kokeeseen kerrospaksuuksia, joita tehdään myös tuotantokiekoille.

4.1.1 Toimenpiteet

Koe aloitettiin ottamalla varastosta 2 erää Okmeticin 20016 partikkelitestikiekkoja (675 µm), joissa molemmissa oli 25 testikiekkoa. Erät jaettiin kolmeen osaan ja eri osille kasvatettiin erilaisia ohutkalvoja.

Erilaisia vaihtoehtoja tuotantoreseptien pohjalta:

- 100 nm nitridiä
- 250 nm nitridiä
- 200 nm oksidia
- 800 nm oksidia
- 200 nm oksidia + 100 nm nitridiä
- 200 nm oksidia + 250 nm nitridiä.

Erät nimettiin ja koodattiin ennen kalvojen kasvatusta. Kalvot kasvatettiin kiekkojen hienohiotulle puolelle, koodaus tuli toiselle puolelle. Erät nimettiin MFI:n koejärjestelmän mukaisesti eriksi KOE7874A ja KOE7874B ja kiekkokoodit koodattiin kiekonkoodauslaitteella. Kiekkokoodit tulivat periaatteella: KOE7874A01, ..02, ..03, jne., ..25. Erille kirjoitettiin myös ohjekortit, joissa luki tarvittavat tiedot eristä sekä ohjeistus erien prosessointiin. Erät prosessoitiin operaattorivoimin normaalin tuotannon ohella.

Erä A:

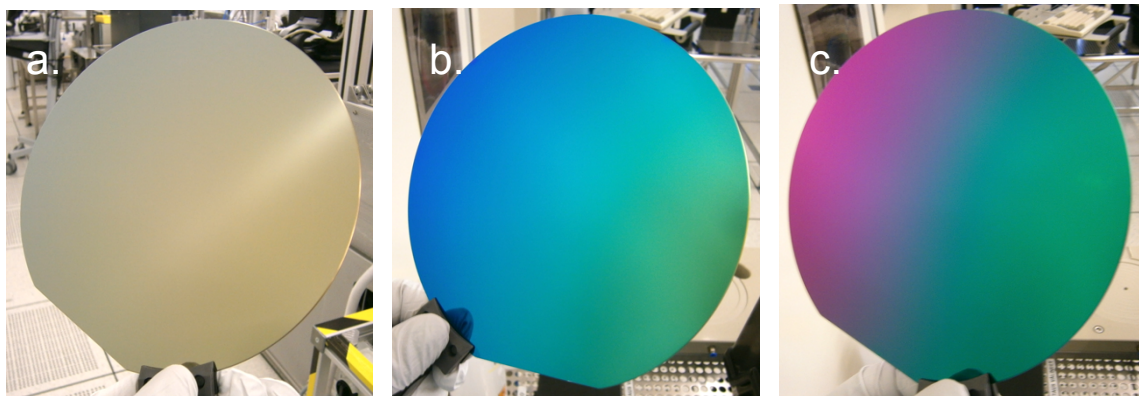
Kiekoille 1–8 200 nm oksidia + 250 nm nitridiä,
kiekoille 9–16 200 nm oksidia + 100 nm nitridiä ja
kiekoille 17–25 200 nm oksidia.

Erä B:

Kiekoille 1–9 250 nm nitridiä,
kiekoille 10–16 800 nm oksidia ja
kiekoille 17–25 100 nm nitridiä.

4.1.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Kiekot näyttivät prosessoinnin jälkeen hyviltä, nitridi ja oksidi olivat kasvaneet kiekkoille tasaisesti eikä kiekkoissa näkynyt naarmuja. Kuvassa 12 on esitetty tuotettuja kiekkoja.



Kuva 12. Erilaisia ohutkalvoja piikiekoilla: a) 200 nm oksidia b) 200 nm oksidia ja 100 nm nitridiä c) 200 nm oksidia ja 250 nm nitridiä.

Seuraavaksi kiekkoja ajettiin PERIE:llä erilaisilla etsausasetuksilla, joita muokattiin tulosten perusteella kunnes löytyi sellainen resepti, joka jätti kiekon reunalle tasaisen, näkyvän ja mitattavissa olevan reunakaistaleen.

4.2 Monitorointiohjelman määrittäminen

Jotta kiekon keskityksen näkisi mahdollisimman hyvin, olisi etsausohjelman oltava sellainen, jossa kiekon reunoille jäisi tasainen etsaamaton kaistale. Kaistaleen tulisi olla nähtävissä, jotta sen mittaaminen onnistuisi. Plasmaetsauksen lopputuloksen ennus-

taminen tunnetuista prosessiparametreista on erittäin haastavaa, sillä kaikkia prosessimekanismeja ei tunneta riittävästi, joten monitoroinnissa käytettävää etsausohjelmaa ja toivottua lopputulosta haettiin kokeilemalla. Muutettavia prosessiparametreja olivat aika (s), viive (s), ylietsaus ja kynnyksarvon taso (%). [22.]

4.2.1 Toimenpiteet

Monitorointiresepti luotiin tuotantoreseptin pohjalta ja muokattaviksi tuotantoresepteiksi valittiin reseptejä, joissa ylietsaus oli mahdollisimman pieni. Kun resepti oli luotu, kehtiin kiekkojen prosessointia ja laitteelta nähtävien endpoint -käyrien perusteella säädettiin prosessiparametreja, kuten etsausaikaa ja ylietsausta. Prosessoitavat kalvot, ohjelmepohjat sekä luodut ohjelmat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Prosessoitavat kalvot ja muokattavat prosessiohjelmat.

Etsattavat kalvot	Etsausohjelmepohja	Luotu etsausohjelma
200 nm oksidia + 250 nm nitridiä	NIT_mask,	PAFI_OXNIT250
200 nm oksidia + 100 nm nitridiä	NIT_mask	PAFI_OXNIT100
200 nm oksidia	OXIDE_ER/OXIDEMASK_16	PAFI_OX200
250 nm nitridiä	NIT-ETCH	PAFI_OX250
800 nm oksidia	OXIDEMASK_16	PAFI_OX800
100 nm nitridiä	NIT-ETCH	PAFI_NIT100

Prosessiohjelmien parametrit eli eri testien etsausasetukset ja havainnot testiajoista on esitetty liitteessä 1: Monitorointiohjelman määrittämiseen käytetyt prosessiparametrit sekä havainnot testiajoista. Taulukot on värikoodattu prosessoitavien kalvojen mukaan. Koekiekot, joilla oli 200 nm oksidia, etsattiin kahdella eri ohjelmalla: OXIDE_ER ja OXIDEMASK_16. Testien perusteella resepti OXIDE_ER ei soveltunut kokeeseen. Resepti on oksidietsausnopeuden monitorointiresepti ja se poikkeaa paljon tuotantoresepteistä. Tästä syystä tilalle valittiin tuotantoresepti OXIDEMASK_16 ja vanha PAFI_OX200-resepti korvattiin uudella. Resepti vaihdettiin ennen kiekon A20 prosessointia. [23.]

4.2.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

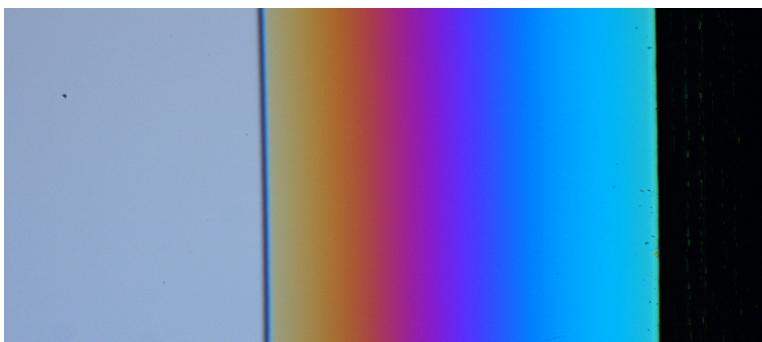
Kokeilujen perusteella parhaaksi monitorointikiekoksi selvisi testikiekko, jolle kasvatettiin 200 nm oksidia ja 250 nm nitridiä. Kiekolta etsattiin ensin nitridikerros pois PERIE-

laitteella erillisellä monitorointireseptillä. Kuvassa 13a on esitetty, miltä valitun koekiekon reuna näytti PERIE:n jälkeen. Reunalle oli muodostunut tasainen etsaamaton kaistale. Kuva 13b esittää, miltä reunajäämä näytti mikroskoopilla. Mikroskoopilla tarkasteltaessa selvisi, ettei kaistaleen reuna ollut tässä vaiheessa vielä tarpeeksi terävä, jotta reunajäämän leveyden mittaaminen olisi onnistunut.



Kuva 13. Koekiekon reunajäämä plasmaetsauksen jälkeen a) silmämääräisesti ja b) mikroskoopilla 2,5-kertaisella suurennoksella tarkasteltuna.

Kiekolla oli kuitenkin vielä jäljellä oksidikerros, joka etsattiin pois puskuroidulla fluoriveydellä SAT:lla (Spray Acid Tool) kolmen minuutin ohjelmalla. Kuvassa 14 on esitetty, miltä jäämän reuna näytti oksidin poiston jälkeen.



Kuva 14. Koekiekon reunajäämä oksidin poiston jälkeen mikroskoopilla 2,5-kertaisella suurennoksella.

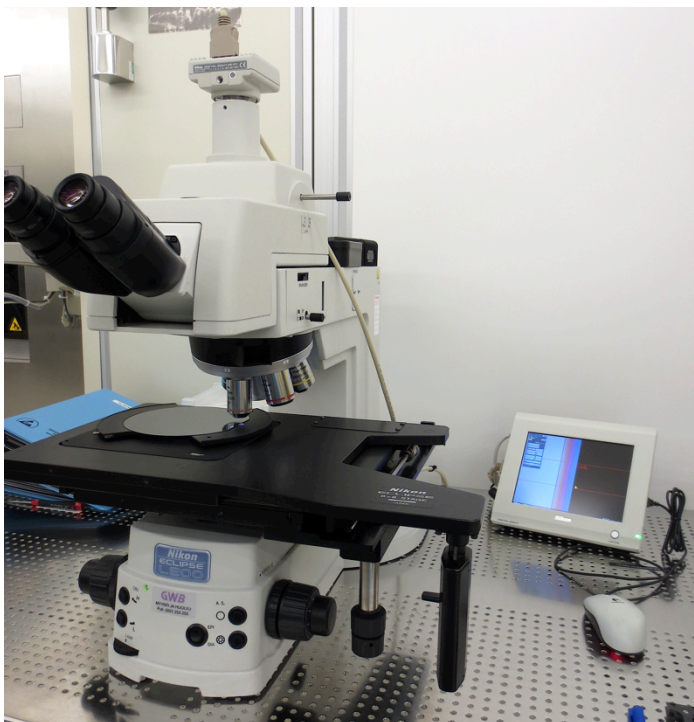
Kiekon reunalle jäi nitridin plasmaetsauksen jälkeen reunajäämä, joka toimi maskina oksidille HF-etsauksessa, joten kiekon reunalle jäi 200 nm oksidia ja noin 250 nm nitridiä. Nitridikerroksen alla ollut oksidi todennäköisesti kuitenkin etsaantui hieman, minkä ansiosta jäämän reuna näkyi tummana viivana. Tästä mustasta viivasta reunanlevey-

den mittaaminen onnistuu helposti ilman tulkinnan varaa ja näin ollen mittaustulosten pitäisi olla yhteneviä ja tarkkoja. Jäämän reunasta tuli kiekolla A1 niin selkeästi näkyvä ja helposti mitattava, että monitorointimenetelmän kehittämistä päätettiin jatkaa kyseisenlaisella kiekolla, eikä näin ollen kaikkia valmistettuja koekiekkoja tarvinnut prosessoida.

4.3 Mittausmenetelmän määrittäminen

Koekiekoissa näkyi prosessoinnin jälkeen jäämänä sateenkaarireuna, joka päättyi kontrastiltaan melko tarkkaan mustaan viivaan. Reunajäämän leveyttä mittaavan mittausmenetelmän tulee olla yksinkertainen ja tuotannon ohella sujuvasti toimiva sekä luotettavasti toistettavissa oleva.

Yhtenä mahdollisuutena oli käyttää mikroskooppia, joka sijaitsee laitteen läheisyydessä. Kuvassa 15 on esitetty mikroskooppi sekä sen näyttö.



Kuva 15. Mikroskooppi ja mikroskoopin näyttö.

Mikroskoopissa on kamera sekä pieni näyttö kuvien ottamista varten. Näytön työkaluista löytyy mittausruudukko, jonka avulla on mahdollista mitata x- ja y-suunnassa mikroskoopilla nähtävien rakenteiden mittoja 0,01 mikrometrin tarkkuudella.

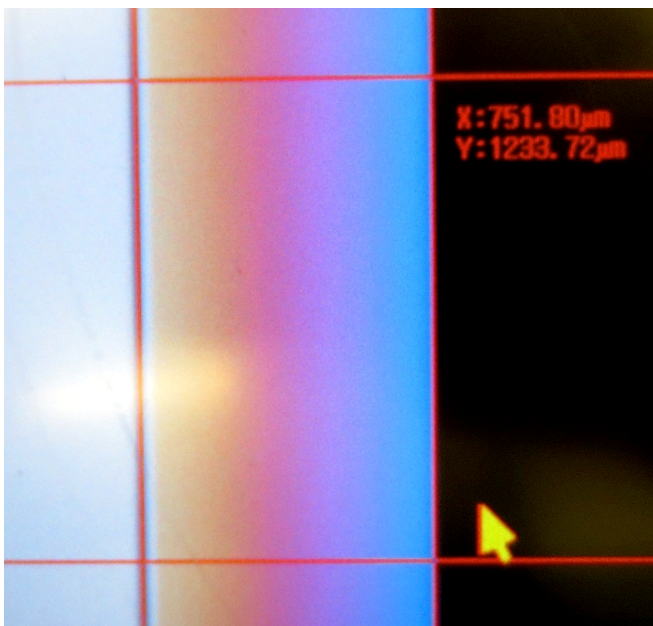
4.3.1 Toimenpiteet

Mittausmenetelmän määrittäminen aloitettiin tutkimalla kiekon A01 reunajäämää mikroskoopilla. Kuvassa 16 on esitetty reunajäämä mikroskoopin näytöllä 2,5-kertaisella suurennoksella. Näytöllä näkyy myös grid-mittaustyökalun antamat punaiset viivat.



Kuva 16. Kiekon A01 reunajäämä mikroskoopin näytöllä

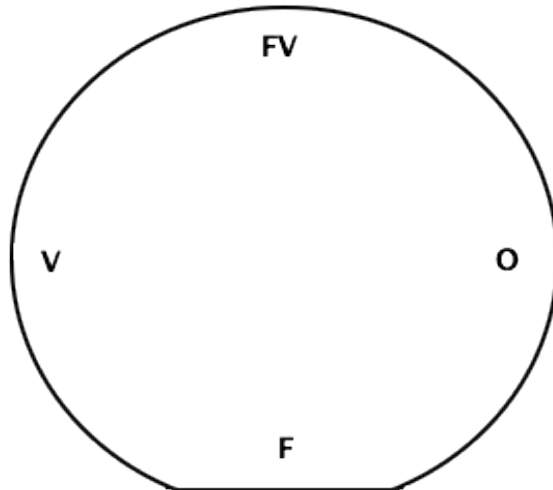
Mittaustyökalu antaa kaksi y-akselia ja kaksi x-akselia, joten mikroskoopilla näkyvien rakenteiden mittaaminen onnistuu molemmissa suunnissa. Koska nyt mitattiin reunajäämän leveyttä, luettiin mittaus työkalun antamaa x-arvoa. Kuvassa 17 on kuvattuna mittaus työkalun käyttö.



Kuva 17. Reunajäämän leveyden mittaaminen grid-mittaustyökalulla

Mittaus tapahtui vetämällä toinen y-akseli jäämän reunalle eli mustaan viivaan sateenkaaren ja valkoisen osan väliin ja toinen kiekon reunalle eli sateenkaaren ja mustan osan väliin. Näin saatiin y-akselien välinen x-akselin arvo eli jäämän leveys, joka tässä tapauksessa oli 751,80 μm .

Jotta kiekon keskitys saadaan selville, pitää kiekkoa mitata neljältä reunalta: suoralta reunalta (F), vasemmasta reunasta (V), suoraa reunaa vastapäätä olevalta reunalta (FV) ja oikealta reunalta (O). Kuvassa 18 on esitettyinä piikiekon muoto sekä mittapisteet. Mikroskoopilla käytettiin 2,5-kertaista suurennosta, sillä silloin reunajäämä näkyi koko leveydeltään mikroskoopin näytöllä ja jäämän reunan tarkkuus oli paras.



Kuva 18. Reunajäämän leveyden mittauskohdat F (flat- eli suorareuna), V (vasen reuna), FV (flat-reunaa vastapäätä oleva reuna) ja O (oikea reuna) piikiekolla.

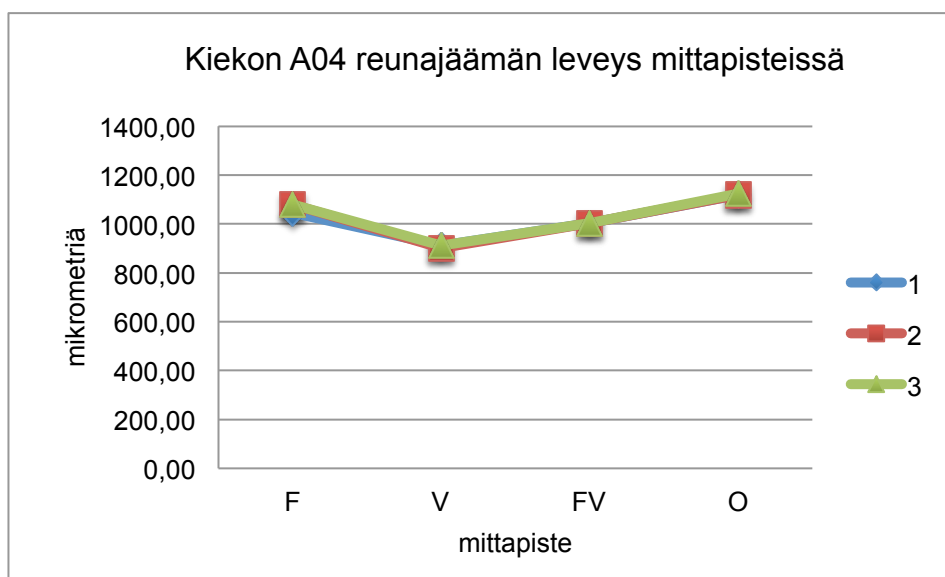
Seuraavaksi tutkittiin mikroskoopilla tehtävän mittauksen hajontaa mittaamalla samaa kiekkoa 3 kertaa. Hajonnan selvittelyyn käytettiin kiekkoa A04, joka oli etsattu samoilla parametreilla kuin kiekko A01, mutta mahdollisimman keskellä kammiota.

4.3.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Taulukossa 2 on esitetty mittaustulokset kiekon A04 reunajäämän leveydestä. Tulokset ovat mikrometreissä. Mittauksissa mikroskoopin asetuksissa A.S. oli "täysillä" ja LAMP pienimmällä. Kuvassa 19 on esitetty mittaustulokset graafisesti.

Taulukko 2. Reunajäämän leveys mittapisteissä F, V, FV ja O kiekolla A04 (μm)

Kiekon A04 reunajäämän leveys mittapisteissä F, V, FV ja O (μm)				
Mittaus	F	V	FV	O
1	1045,77	910,83	1002,40	1118,06
2	1079,51	901,19	1002,40	1118,06
3	1079,51	910,83	1002,40	1122,88



Kuva 19. Reunajäämän leveys mittapisteissä F, V, FV ja O kiekolla A04 (μm)

Mittauksessa ilmeni kuitenkin muutamia ongelmia. Heti alussa selvisi, että mikroskoopin kamera oli vinossa. Kun mikroskoopilla kiekon suorareuna näytti silmämääräisesti olevan suorassa, näkyi se mikroskoopin näytöllä selvästi vinossa näytöllä olevan grid-työkalun perusteella. Ongelma korjaantui kuitenkin helposti, kun huoltohenkilökunta suoristi kameran vastaamaan mikroskoopilla nähtävää suuntausta. Tästä huolimatta mittaushkohtien määrittäminen oli vaikeaa, sillä mittapisteitä ei ollut merkitty kiekoon millään tavalla, joten ne piti "hakea" kiekolta arvioimalla silmämääräisesti reunojen keskikohtien sijainnit. Ratkaisuna tähän, päätettiin tehdä kiekkoalusta, johon mittapisteet on merkitty. Näin mittaus tapahtuu aina samasta kohtaa mittaajasta riippumatta. Kiekolta A04 tehtyjen mittausten perusteella mikroskoopilla näytti olevan mahdollista saada toistettavia tuloksia, kunhan vain mittapiste saatiin aina samaan kohtaan kiekolla.

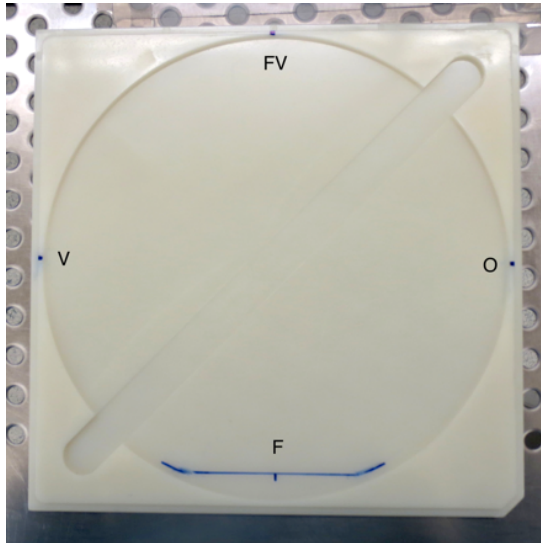
4.4 Kiekkoalustan määrittäminen

Mittauksessa tarvitaan alustaa, jossa mitattava kiekko pysyy paikallaan, vaikka sitä pyöritetäänkin mikroskoopilla. Alustaan pitää myös olla mahdollista merkitä mittapisteet, jotta mittaaminen samasta kohdasta onnistuisi joka kerta. Tuotannossa käytetään joissain tilanteissa muovisia kiekkoalustoja mikroskoopilla tehtävissä mittauksissa. Kiekkoalusta on vaalea, joten merkittävät mittapisteet näkyvät alustalla hyvin. Lisäksi alustassa on pyöreä syvennys kiekkoa varten. Ongelmana syvennyksessä on kuitenkin

kin, että se on isompi kuin kiekko, eikä siinä ole suoraa reunaa. Näin ollen kiekko pääsee liikkumaan alustalla.

4.4.1 Toimenpiteet

Ensimmäinen prototyyppi kiekkoalustasta on esitetty kuvassa 20. Kiekkoalustaan piirrettiin sinisellä tussilla suorareuna sekä mittapisteet F, V, FV ja O.



Kuva 20. Ensimmäinen kiekkoalusta.

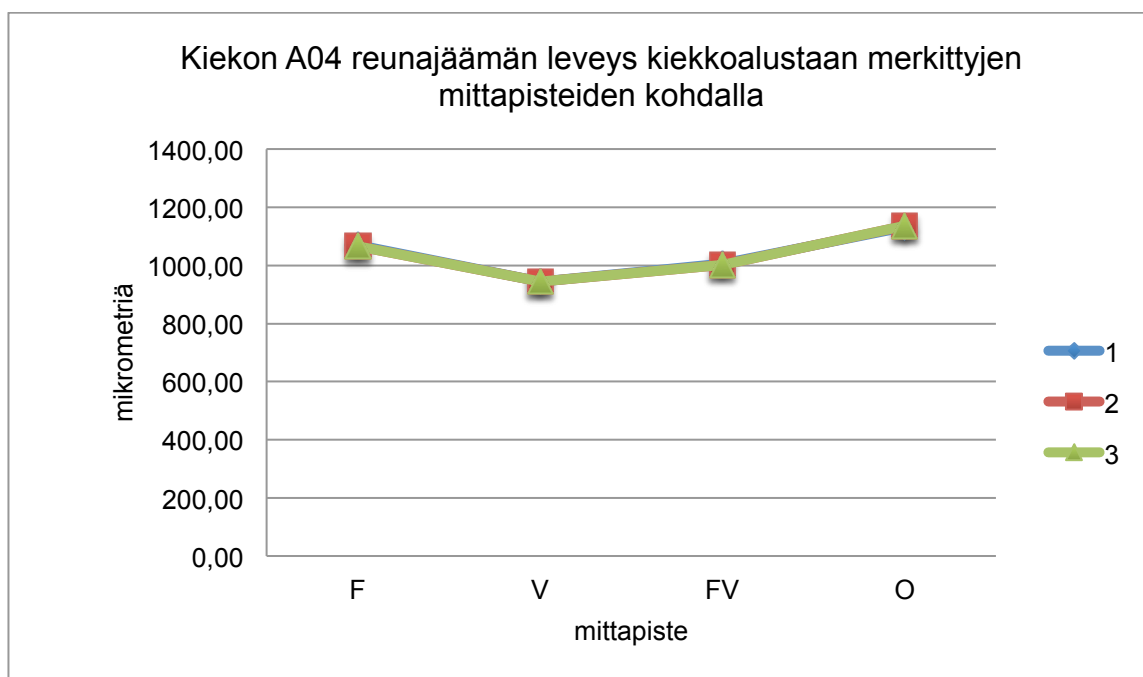
4.4.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Taulukossa 3 on esitetty kiekon (A04) reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden kohdalla.

Taulukko 3. Kiekon A04 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla.

Kiekon A04 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden kohdalla (µm)				
Mittaus	F	V	FV	O
1	1069,87	944,57	1007,22	1132,52
2	1065,05	944,57	1002,40	1137,34
3	1065,05	944,57	1002,40	1137,34

Kuvassa 21 on esitetty edellä olevat mittaustulokset graafisesti. Kiekko A04 oli etsattu mahdollisimman keskellä kammiota, joten kuvaajan tulisi olla mahdollisimman vaakasuora. Tämä perustuu siihen olettamukseen, että kun kiekko on prosessoitaessa ihan keskellä kammiota, syöpyy se tasaisesti kaikilta reunoilta, ja koekiekoilla nähtävä reunajäämä on yhtä leveää kaikilla reunapisteillä. Kun siis reunajäämän leveys on sama kaikkien mittapisteiden kohdalla ja kuvaajalle muodostuva suora on yhdensuuntainen x-akselin kanssa, voidaan olettaa, että kiekko on ollut ihan keskellä etsausalustaa ja yhtä lähellä uniformity ringiä kaikilla reunoilla.



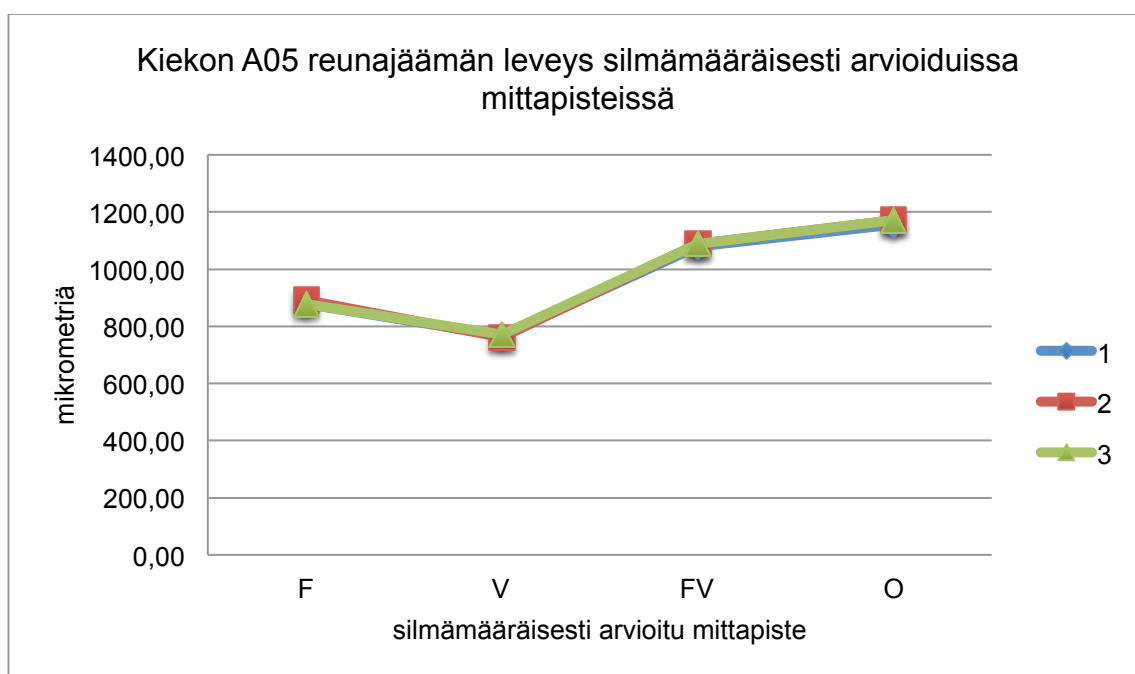
Kuva 21. Kiekon A04 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla.

Kuvan 21 käyrä näyttää oletuksen mukaan siltä, että koekiekko on ollut melkein keskellä etsausalustaa, sillä reunajäämien leveydet ovat lähellä toisiaan. Reunajäämän leveydessä eri mittapisteissä on kuitenkin eroja, joten kiekko ei ole ollut aivan keskellä, mutta erot ovat suhteellisen pieniä ja kuvaaja on melko suora.

Mittausalustan toimivuuden varmistamiseksi reunajäämän leveys alustaan merkittyjen mittapisteiden kohdalla mitattiin myös kiekolta A05, jonka reunajäämien leveyksissä oli enemmän eroja. Taulukossa 4 on esitetty kiekon A05 reunajäämän leveys, joka mitattiin ensin ilman kiekkoalustaa silmämääräisesti arvioiduista mittapisteistä. Kuvassa 22 on esitetty mittaustulokset graafisesti.

Taulukko 4. Kiekon A05 reunajäämän leveys silmämääräisesti arvioituissa mittapisteissä F, V, FV ja O.

Kiekon A05 reunajäämän leveys silmämääräisesti arvioituissa mittapisteissä (µm)				
Mittaus	F	V	FV	O
1	877,10	766,26	1079,51	1156,61
2	891,56	761,44	1089,14	1171,07
3	877,10	771,08	1089,14	1171,89

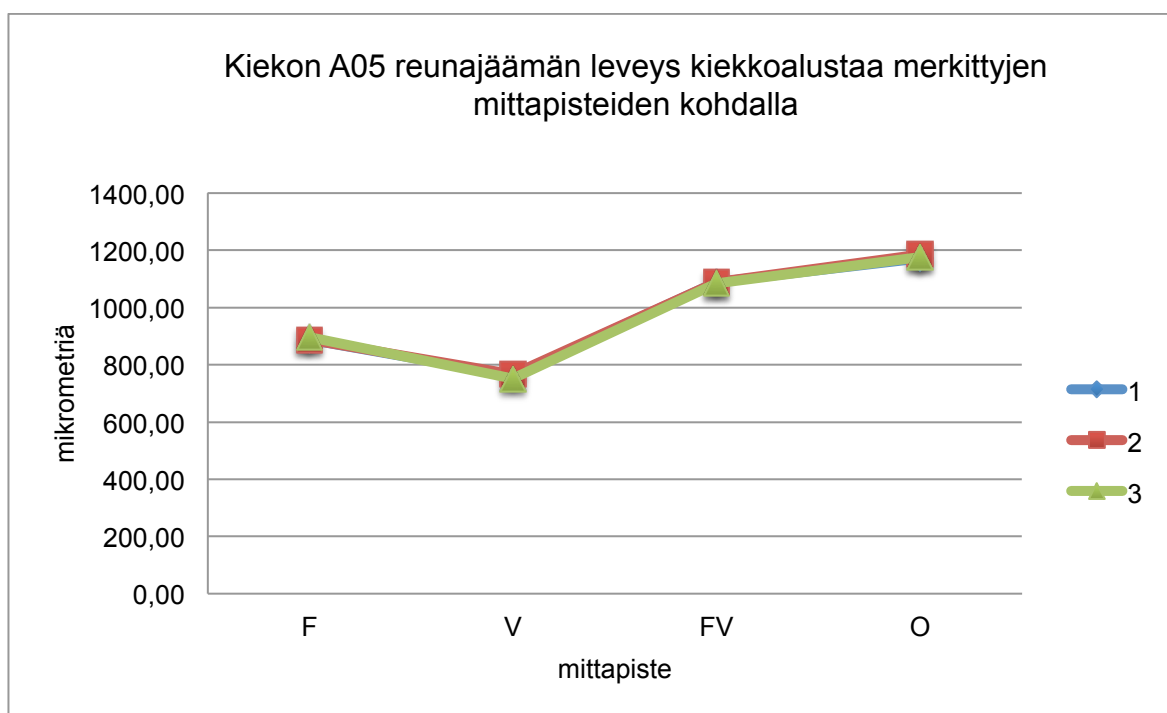


Kuva 22. Kiekon A05 reunajäämän leveys silmämääräisesti arvioituissa mittapisteissä F,V, FV ja O.

Taulukossa 5 on kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden kohdalla. Kuvassa 23 on esitetty mittaustulokset graafisesti.

Taulukko 5. Kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla

Kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden kohdalla (µm)				
Mittaus	F	V	FV	O
1	886,74	761,44	1089,14	1171,07
2	886,74	766,25	1089,14	1185,53
3	896,38	751,80	1084,32	1175,89

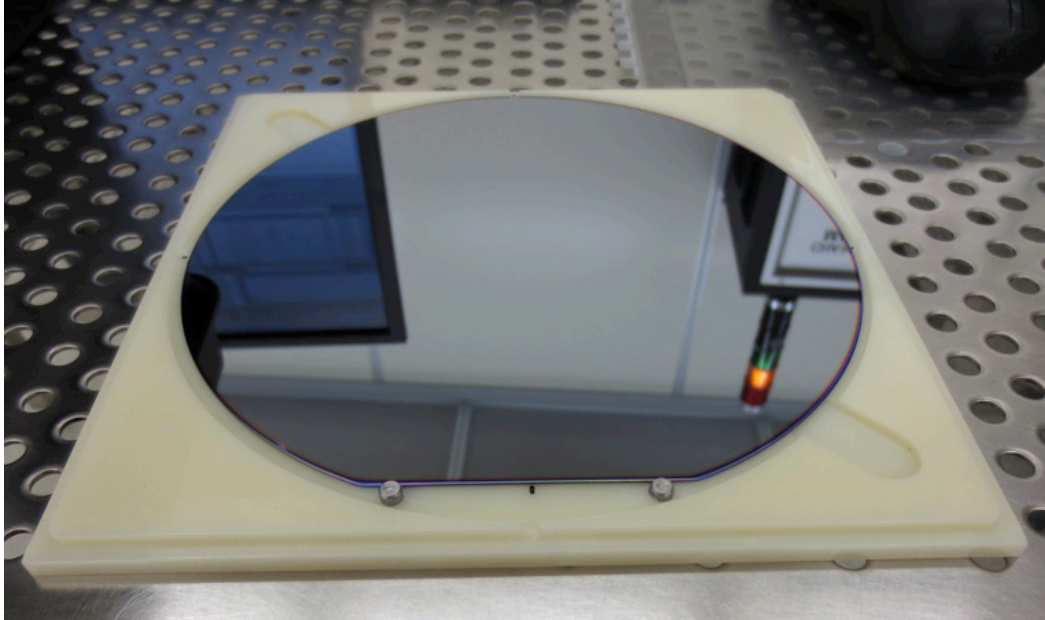


Kuva 23. Kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalustaan merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla

Kuvasta 23 nähdään, että kiekon A05 reunajäämän leveydessä on enemmän vaihtelua kuin kiekon A04. Kiekko A04 oli pyritty prosessoimaan mahdollisimman keskellä et-sausalustaa, kun taas kiekko A05 prosessoitiin kiekkoa kuljettavan käsivarren asetuksen muuttamisen jälkeen, jolloin reunajäämän leveyden vaihtelu oli kasvanut.

Kiekkoalusta ei kuitenkaan ollut vielä paras mahdollinen, sillä suorareuna oli vain piirretty siihen, joten mitattava kiekko pääsi vapaasti liikkumaan alustalla. Alustaa ei myöskään voinut puhdistaa kunnolla, sillä tussimerkinnot olisivat mahdollisesti lähte-

neet. Ratkaisuna tähän tehtiin kiekkoalusta 2, jossa suorareunan paikka merkittiin metallisilla tapeilla. Näin kiekon sai helposti suoraan alustalle, eikä se päässyt liikkumaan siinä. Kuvassa 24 on esitetty uusi kiekkoalusta.

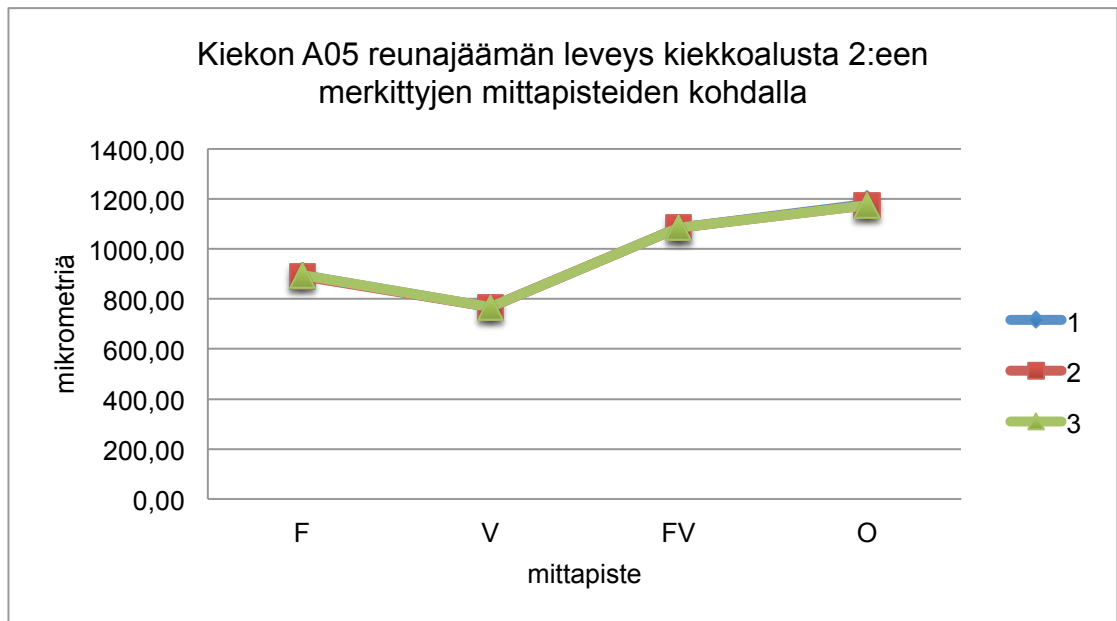


Kuva 24. Kiekkoalusta 2.

Taulukossa 6 on esitetty kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalusta 2:een merkittyjen mittapisteiden kohdalla. Kuvassa 25 on esitetty mittaustulokset graafisesti.

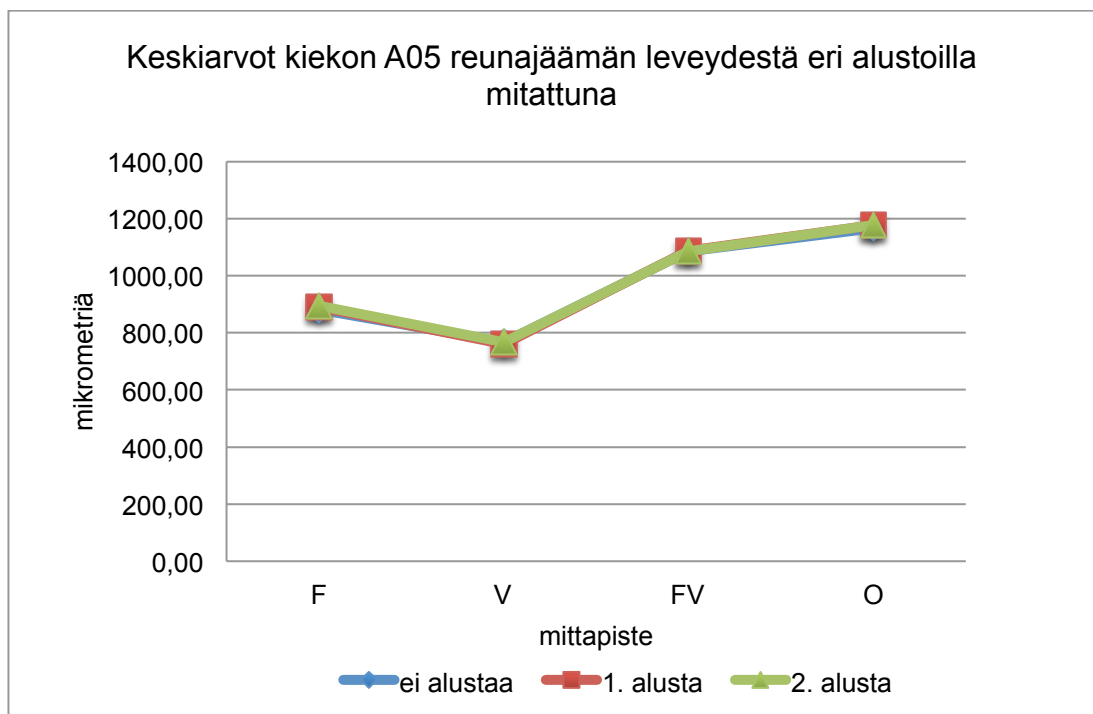
Taulukko 6. Kiekon A05 reunajäämän leveys pysäytystapeilla varustettuun kiekkoalusta 2:een merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla.

Kiekon A05 reunajäämän leveys kiekkoalusta 2:een merkittyjen mittapisteiden kohdalla (µm)				
Mittaus	F	V	FV	O
1	896,38	766,26	1084,32	1180,71
2	891,56	766,26	1084,32	1175,89
3	896,38	766,26	1084,32	1175,89



Kuva 25. Kiekon A05 reunajäämän leveys pysäytystapeilla varustettuun kiekkoalusta 2:een merkittyjen mittapisteiden F, V, FV ja O kohdalla.

Kuvassa 26 on vielä esitetty reunajäämien leveyksien keskiarvot mittapisteissä kiekolta A05 erilaisia mittausalustoja käytettäessä.



Kuva 26. Reunajäämän leveyden keskiarvot mittapisteissä F, V, FV ja O kiekolta A05 eri mittausalustoilla mitattuina.

Tulokset olivat hyviä, eikä alustojen välillä näkynyt suuria eroja. Monitorointiin valittiin kuitenkin uusin alusta eli se, jossa alustaan merkityssä suorassa reunassa on metallitapit. Tällä alustalla saadaan luotettavimmat tulokset, sillä siinä kiekko ei pääse liikkumaan ja mittapisteen pysyvät samassa kohdassa koko ajan. Mittausmenetelmä vaikutti toimivalta ja käyristä oli mahdollista nähdä, oliko kiekko keskellä kammiota vai ei. Mittausmenetelmää piti kuitenkin vielä analysoida ja selvittää, kuinka toistettava ja uusittava se oli.

4.5 Mittausmenetelmän analysointi

Mittausmenetelmä analysoitiin mittausmenetelmäanalyysin eli MSA:n työkalujen avulla. Käytettäviä työkaluja olivat mittauksen toistettavuutta (Repeatability), uusittavuutta (Reproducibility) ja kokonaisvaihtelua arvioiva Gage R&R -menetelmä sekä mittalaitteen poikkeamaa arvioiva Bias-menetelmä. Toistettavuus kuvaa mittalaitteesta aiheutuvaa vaihtelua ja uusittavuus mittaajasta aiheutuvaa vaihtelua. Lineaarisuutta ja stabiilisuutta ei mittausmenetelmästä kuitenkaan selvitetty. Lineaarisuus kuvaa Bias-virheen eli poikkeaman muutosta mittausalueella. Monitoroinnissa mittaus tulokset ovat kuitenkin niin samoilla alueilla, ettei lineaarisuuden määrittämiselle ollut tarvetta. Stabiilisuus taas kuvaa poikkeaman muutosta ajan kuluessa. Kuitenkin, koska tämän selvittäminen vaatii pitkän aikavälin, ei sitä otettu mukaan insinööritoimintaan. [21; 24.]

4.5.1 Toimenpiteet Gage R&R -menetelmässä

Tutkimuksen suorittamiseen tarvittiin kolme operaattoria, jotka kaikki mittasivat yhden kiekon kolme kertaa. Mittaukset suoritettiin satunnaisessa järjestyksessä eivätkä mittaajat saaneet nähdä edellisen mittauksensa tuloksia. Operaattoreille annetut ohjeet mittaamisen suorittamisesta löytyvät liitteestä 2: Mittausohjeet operaattoreille Gage R&R -menetelmää varten. [24.]

4.5.2 Toimenpiteet BIAS-menetelmässä

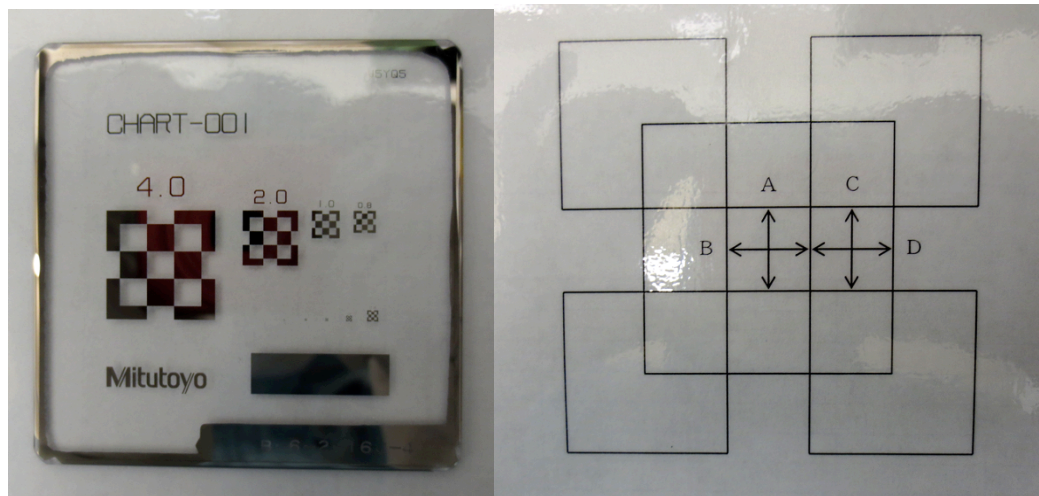
Koska mikroskooppi on kalibroitava laite, oli syytä selvittää sen tämänhetkinen poikkeama eli bias, jotta monitorointimenetelmä voidaan tulevaisuudessa päivittää mikroskoopin kalibroinnin jälkeen. Tämän selvittämiseen tarvittiin standardipala, jossa on todellisuutta vastaavat mitat. Vertaamalla mikroskoopilla saatuja mittauksia standardi-

palan mittoihin, saatiin selville mikroskoopin poikkeama eli kuinka paljon sillä tehdyt mittaukset eroavat todellisista arvoista. [24.]

Kokeen tarkoituksiin sopiva standardipala löytyi sahauksen solusta:

VISION2/SAHAUS
MITTALAITE 630 T 02 S/N B-6-2-16J-4
CHART-001

Kuvassa 27 on esitetty standardipala ja palassa oleva kuvio sekä sen mittausvälit.



Kuva 27. a) Standardipala ja b) standardipalan mittausvälit A, B, C ja D.

Koska reunaleveys kiekkoissa on 1000 mikrometrin luokkaa, valitaan standardipalasta 1000 mikrometrin kuvio mitattavaksi eli 1.0 (kolmanneksi suurin kuvio). Taulukossa 7 on esitetty mittausvälien A, B, C ja D todelliset mitat palassa.

Taulukko 7. Standardipalassa olevan 1.0-kuvion todelliset mitat mittausväleissä A, B, C ja D (μm).

1.0 (1000 μm:n) -kuvion todelliset mitat mittapalassa	
Mittausvälin nimi	Mittausvälin todellinen mitta palassa (μm)
A	1000,10
B	1000,01
C	999,85
D	999,85

Poikkeaman selvittämistä varten standardipalassa olevan 1.0-kuvion mittoja A, B, C, ja D mitattiin mikroskoopilla 10 kertaa nostaen mittapala pois mikroskoopilta aina mittauksen välissä.

4.5.3 Tulokset ja tulosten arviointi toistettavuudesta ja uusittavuudesta

Tulokset operaattoreiden suorittamista mittauksista analysoitiin Minitab-ohjelmistolla. Kokeessa käytettiin Gage R&R Crossed -menetelmää, jossa samaa osaa mitataan useita kertoja. Operaattorit 1, 2 ja 3 mittasivat siis saman koekiekon reunajäämän leveyttä mittapisteissä F, V, FV ja O jokainen kolme kertaa satunnaisessa järjestyksessä niin, että koekiekkko asetettiin aina uudelleen kiekkoalustalle ja mikroskoopille mittauksen välissä. Taulukoissa 8–10 on esitetty mittauksen tulokset.

Taulukko 8. Operaattoreiden 1, 2 ja 3 ensimmäisen mittauksen tulokset (reunajäämän leveys koekiekon mittapisteissä (μm))

1. Mittaus			
	Operaattori 1	Operaattori 2	Operaattori 3
F	891,56	891,56	881,92
V	766,26	766,26	746,98
FV	1089,14	1093,96	1089,14
O	1185,53	1190,35	1176,25

Taulukko 9. Operaattoreiden 1, 2 ja 3 toisen mittauksen tulokset (reunajäämän leveys koekiekon mittapisteissä (μm))

2. Mittaus			
	Operaattori 1	Operaattori 2	Operaattori 3
F	881,92	877,10	886,74
V	732,52	751,80	751,8
FV	1084,32	1079,51	1093,96
O	1171,07	1175,89	1175,89

Taulukko 10. Operaattoreiden 1, 2 ja 3 kolmannen mittauksen tulokset (reunajäämän leveys koekiekon mittapisteissä (μm))

3. Mittaus			
	Operaattori 1	Operaattori 2	Operaattori 3
F	886,74	896,38	891,56
V	737,34	761,44	751,80
FV	1079,72	1079,51	1084,32
O	1175,89	1175,89	1175,89

Mittaustulokset syötettiin Minitab-ohjelmaan, josta saatiin seuraavanlaisia tuloksia.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Result

Gage name: PERIE edge width
 Date of study: 24.10.2013
 Reported by: PAFI
 Tolerance:
 Misc:

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Sample	3	999543	333181	7372.68	0.000
Operator	2	140	70	1.54	0.288
Sample * Operator	6	271	45	0.69	0.657
Repeatability	24	1562	65		
Total	35	1001516			

Alpha to remove interaction term = 0.25

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Sample	3	999543	333181	5452.25	0.000
Operator	2	140	70	1.14	0.333
Repeatability	30	1833	61		
Total	35	1001516			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	61.8	0.17
Repeatability	61.1	0.16
Reproducibility	0.7	0.00
Operator	0.7	0.00
Part-To-Part	37013.3	99.83
Total Variation	37075.2	100.00

Process tolerance = 795.17
 Historical standard deviation = 86.25

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)	%Process (SV/Proc)
Total Gage R&R	7.863	47.18	4.08	5.93	9.12
Repeatability	7.817	46.90	4.06	5.90	9.06
Reproducibility	0.851	5.11	0.44	0.64	0.99
Operator	0.851	5.11	0.44	0.64	0.99
Part-To-Part	192.389	1154.33	99.92	145.17	223.06
Total Variation	192.549	1155.29	100.00	145.29	223.25

Number of Distinct Categories = 34

Gage R&R Crossed -menetelmän hyväksymiskriteerit toleranssiväliin ja prosessin normaaliin vaihteluun verraten ovat:

<10 %	Hyväksyttävä tulos
10 %-30 %	Tulos voidaan hyväksyä, mutta se vaatii korjaavien toimenpiteiden suunnittelua mittaussysteemin vaihtelun ja/tai stabiilisuuden parantamiseksi.
> 30 %	Tulos ei ole hyväksyttävä ko. ominaisuuden mittaamiseen.

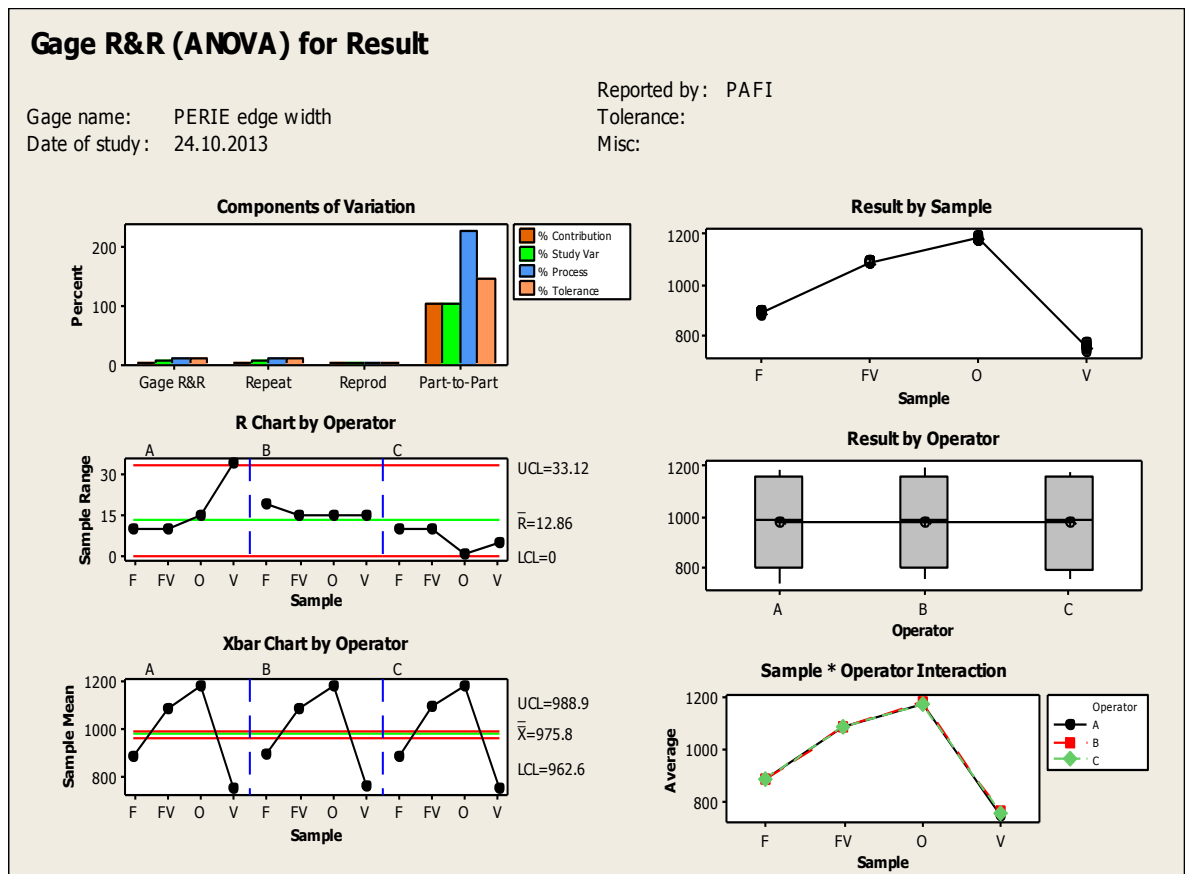
[25, s. 77]

Tulosten mukaan:

%Tolerance (SV/Toler) = **5,93 %**

%Process (SV/Proc) = **9,12 %**

Molemmat tulokset ovat alle 10 %, mikä on AIAG:n MSA-manuaalin [25 s. 77-81] mukaan hyväksyttävä tulos. Kuvassa 28 on esitetty tulokset graafisesti.



Kuva 28. Gage R&R -menetelmän Minitab-tulokset graafisina.

Ensimmäinen kuvaaja (Components of Variation) esittää vaihtelun komponentit prosenttiosuuksittain ja toinen kuvaaja (R Chart by Operator) esittää näytteiden vaihteluvälin. Kolmannessa kuvaajassa (Xbar Chart by Operator) näytetään mittausten välinen vaihtelu suhteessa osien keskiarvojen vaihteluun. Keskellä näkyvät ohjausarvoviivat edustavat mittausten välistä vaihtelua. Jotta tulos olisi hyvä, tulisi mahdollisimman monen keskiarvoista olla ohjausrajoiden ulkopuolella. **Tulosten mukaan kaikki keskiarvot ovat ohjausarvojen ulkopuolella.** Neljäs kuvaaja (Result by Sample) esittää kappaleiden välistä ja sisäistä vaihtelua. Viidennessä kuvaajassa on kunkin osan yksittäiset mittaustulokset eli raakadata ja kuudennessa (Sample * Operator Interaction) kaikkien operaattoreiden tekemät mittaukset. Viidennessä kuvaajassa olevan keskiarvoviivan tulisi olla suora, jotta kaikki ovat mitanneet suurin piirtein samalla tavalla ja tilanne on hyvä. **Tulosten mukaan juuri näin on tapahtunut ja viiva on suora.** Kaiken kaikkiaan tulokset olivat todella hyviä ja ne kertoivat, että mittausmenetelmä oli toistettava ja uusittava. [20; 24.]

4.5.4 Tulokset mittalaitteen poikkeamasta ja tulosten analysointi

Taulukossa 11 on esitetty kymmenen mittauksen (standardipalan mittavälien A, B, C ja D mittaus) tulokset sekä lasketut poikkeama-arvot. Poikkeama on laskettu vähentämällä mitatusta arvosta todellinen arvo.

Taulukko 11. Mikroskoopin bias-virheen mittaustulokset (standardipalan mittavälien A, B, C ja D mittaus).

Mittaustulokset mikroskoopilta näyttöä käyttäen					BIAS			
Mittauskerta	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1007,22	1007,22	992,76	992,76	7,12	7,21	7,09	7,09
2	1007,22	1007,22	992,76	992,76	7,12	7,21	7,09	7,09
3	1002,40	1002,40	992,76	997,58	2,30	2,39	7,09	2,27
4	1012,04	1007,22	997,58	997,58	11,94	7,21	2,27	2,27
5	1007,22	1007,22	992,76	992,76	7,12	7,21	7,09	7,09
6	1002,42	1002,42	997,58	1000,00	2,32	2,41	2,27	0,15
7	1007,26	1004,84	997,58	997,58	7,16	4,83	2,27	2,27
8	1007,26	1007,26	1000,00	997,58	7,16	7,25	0,15	2,27
9	1004,84	1004,84	1002,42	1002,42	4,74	4,83	2,57	2,57
10	1007,26	1007,26	1000,00	1000,00	7,16	7,25	0,15	0,15
ka.	1006,51	1005,79	996,62	997,10	6,41	5,78	3,80	3,32

Tulokset syötettiin Minitab-ohjelmaan, joka antoi seuraavanlaisia tuloksia:

One-Sample T: A

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
A	10	6.414	2.793	0.883	(4.416, 8.412)

One-Sample T: B

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
B	10	5.780	2.032	0.643	(4.327, 7.233)

One-Sample T: C

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
C	10	3.804	2.953	0.934	(1.692, 5.916)

One-Sample T: D

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
D	10	3.322	2.743	0.867	(1.360, 5.284)

Monitoroinnin kannalta tärkeitä seurattavia olivat mitat B ja D. Tulosten perusteella poikkeamakeskiarvo osui 95 %:n todennäköisyydellä **B:n tapauksessa 4,327 ja 7,233 väliin ja D:n tapauksessa 1,360 ja 5,284 väliin.**

Näiden tulosten perusteella mikroskooppi olisi pitänyt kalibroida. Tähän ei kuitenkaan nyt otettu kantaa, sillä tärkeintä monitoroinnin kannalta oli tietää tulevaisuuden kannalta, mikä poikkeaman tilanne oli mittausmenetelmää luotaessa. [20; 24.]

4.6 Mittaustulosten esittäminen

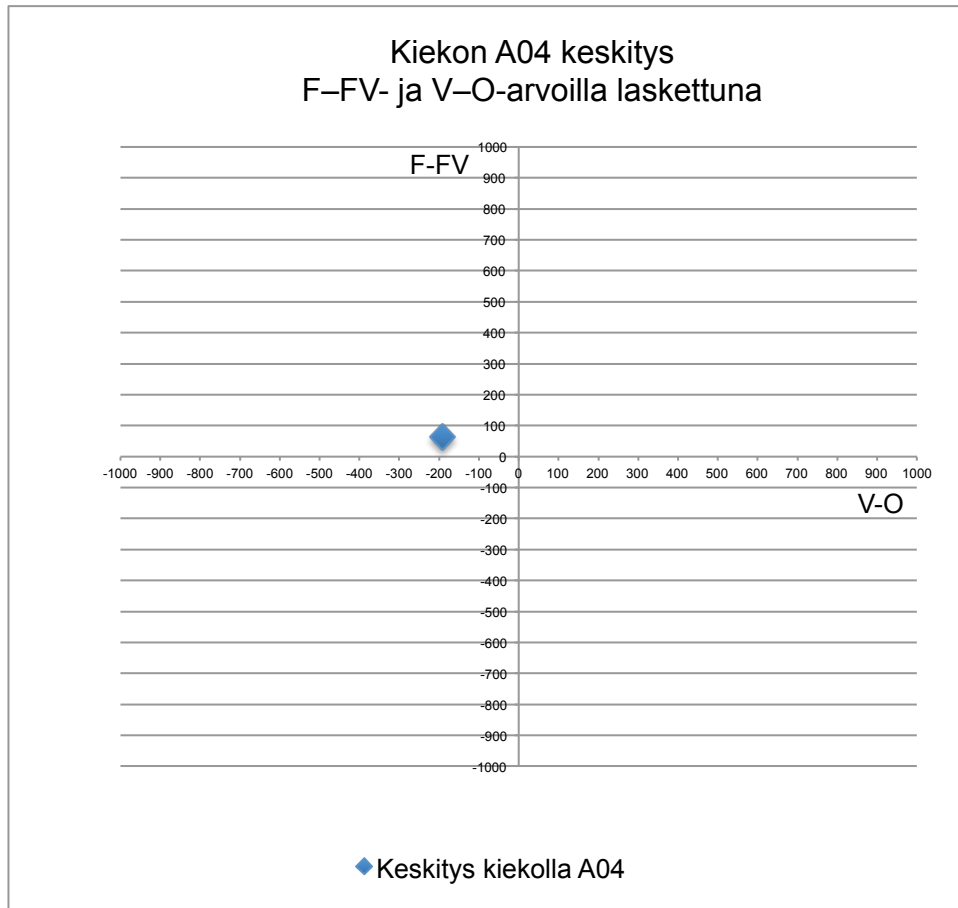
Tavoitteena mittaustulosten analysointimenetelmää tehtäessä oli luoda mahdollisimman yksinkertainen tapa näyttää, kuinka paljon kiekko poikkeaa keskiasemasta. Kiekkoa mitataan neljästä pisteestä kiekon reunalta. Aiemmin esitetyt kuvaajat eivät anna tarpeeksi selkeää kuvaa siitä, onko kiekko ollut keskellä vai ei, joten visuaalisesti paremman tavan löytäminen oli tarpeellista.

4.6.1 Toimenpiteet

Oletetaan, että reunajäämän leveys on vastakkaisissa pisteissä sama, kun kiekko on keskellä kammiota. Näin ollen, kun vastakkaisten mittapisteiden arvot vähennetään toisistaan ja arvoksi saadaan jotain muuta kuin nolla, ei kiekko ole ollut keskellä etsausalustaa, vaan lähempänä uniformity ringiä jommassakummassa reunassa. Kun pisteet F ja FV vähennetään toisistaan ja pisteet V ja O vähennetään toisistaan saadaan tulokseksi kaksi eri arvoa. Kun nämä kaksi arvoa laitetaan koordinaatistoon niin, että toinen on x ja toinen y, saadaan tulokseksi yksi piste, joka kertoo kuinka paljon kiekko eroaa keskitilasta. Kun kiekko on ihan keskellä etsausalustaa, asettuu piste origoon.

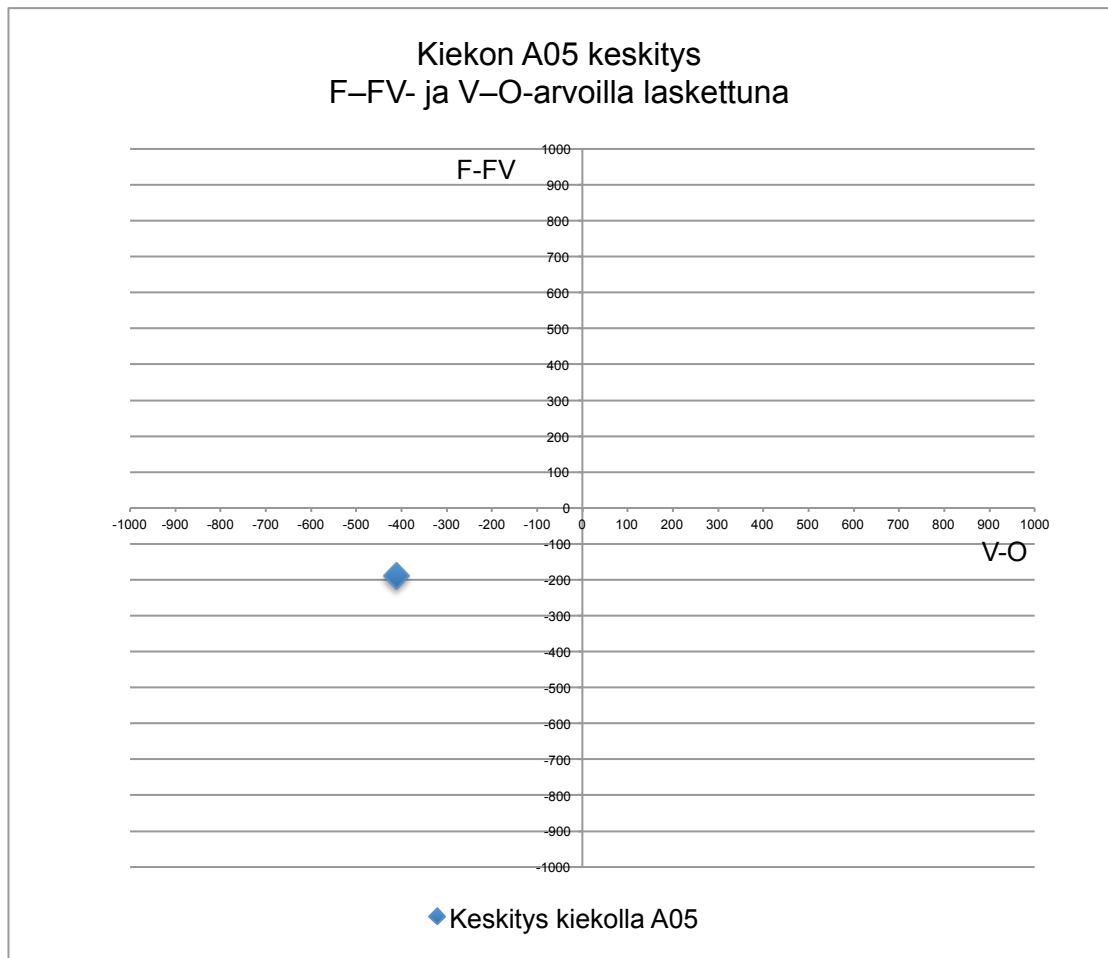
4.6.2 Tulokset ja tulosten arviointi

Kuvassa 29 on esitetty, miltä kiekon A04 keskitys näytti uudella tulosten esitystavalla. Koordinaatistossa V–O on x ja F–FV on y.



Kuva 29. Kiekon A04 keskitys.

Kuvasta 29 voidaan nyt helposti nähdä, että kiekko on ollut melko keskellä kiekkoalustaa, niin kuin sen pitikin. Kuvassa 30 on esitettyä kiekon keskitys kiekolla A05, jonka mittapisteissä oli enemmän eroa kuin kiekolla A04.



Kuva 30. Kiekon A05 keskitys

Kuvasta 30 on nähtävissä, että kiekko A05 eroaa enemmän keskipisteestä kuin kiekko A04, niin kuin pitikin. Näiden tulosten perusteella keskityksen esittäminen x-y-koordinaatistossa on kätevä ja toimiva tapa.

4.7 Keskityksen vaihtelu laitteella kammiokohtaisesti

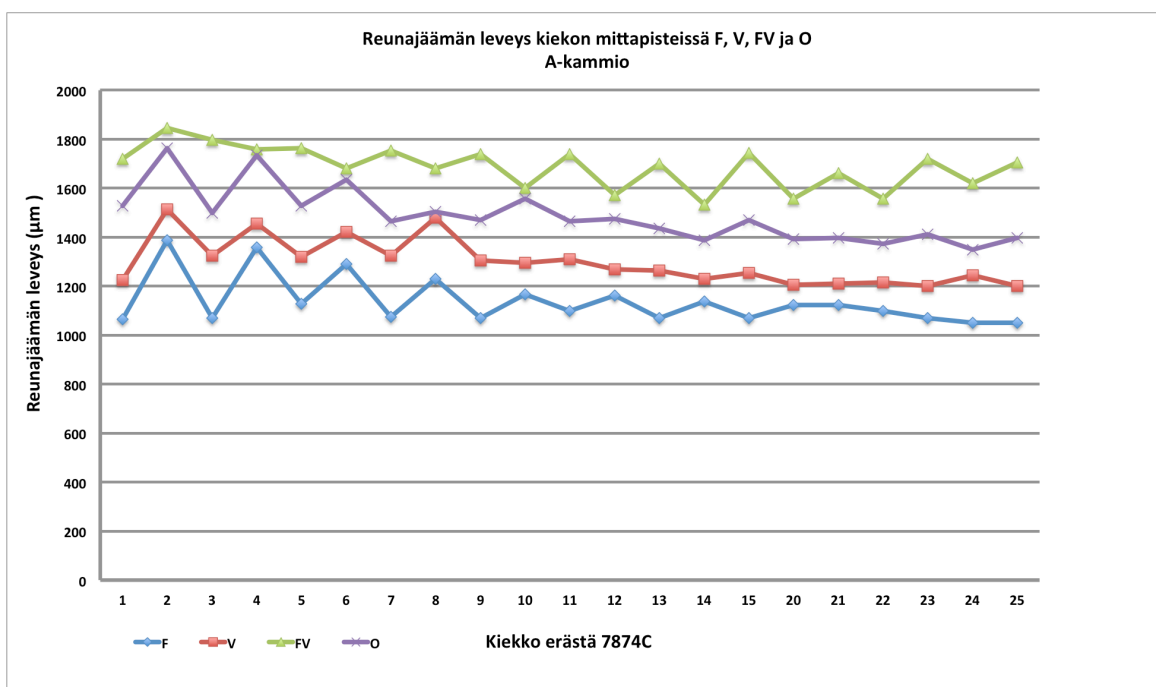
Jotta monitorointimenetelmästä saatiin mahdollisimman luotettava ja käytännössä toimiva, oli tarpeellista selvittää keskityksessä esiintyvä vaihtelu molempien kammioiden kohdalla. PERIE:ssä on kaksi etsauskammiota nopean prosessoinnin mahdollistamiseksi. Kiekkoja on mahdollista prosessoida joko niin, että kiekkoista joka toinen etsataan A-kammiossa ja joka toinen B-kammiossa tai niin, että erän kaikki kiekot etsataan vain toisessa kammioista. Vaihtelua selvitettiin etsaamalla erän kaikki kiekot peräkkäin yhdessä ja samassa kammiossa. Kokeeseen tarvittiin siis kaksi 25 kiekon erää.

4.7.1 Toimenpiteet

Koetta varten otettiin kaksi 25 kiekon erää samoja Okmeticin testikiekkoja kuin aiemmissakin kokeissa. Kiekoille kasvatettiin 200 nm oksidia ja 250 nm nitridiä. Erät nimettiin eriksi 7874C ja 7874E ja koodattiin ennen prosessointia. A-kammioon menevästä erästä piti poistaa kiekot 16–19, sillä niillä ohutkalvot eivät olleet kasvaneet tasaisesti, vaan kiekkojen reunoilla oli läiskiä. Seuraavaksi kiekkoilta etsattiin nitridikerros PERIE:llä aiemmin määritellyllä etsausohjelmalla, minkä jälkeen kiekkoilta poistettiin myös oksidi SAT:lla kolmen minuutin HF-märkäetsausohjelmalla. Tämän jälkeen reunajäämän leveys mitattiin kiekkoilta neljästä aiemmin määritetystä mittapisteestä mikroskoopin ja kiekkoalustan avulla.

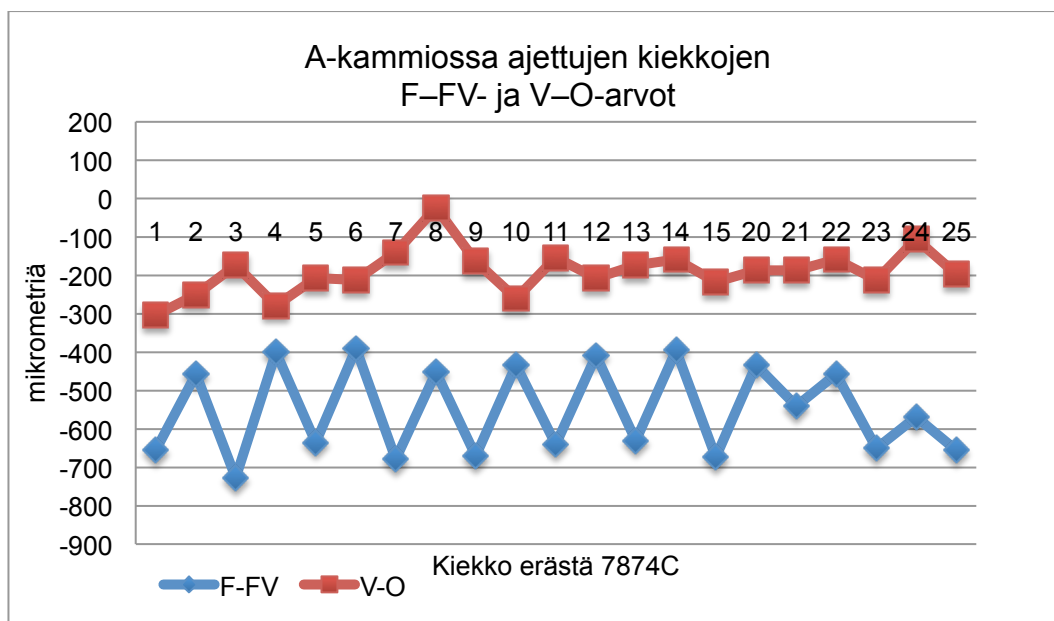
4.7.2 Tulokset ja tulosten arviointi

A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveydet sekä niistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot on esitetty liitteessä 3: Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla. Kuvassa 31 on esitetty reunajäämän leveyden vaihtelu A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla mittapisteissä F, V, FV ja O.

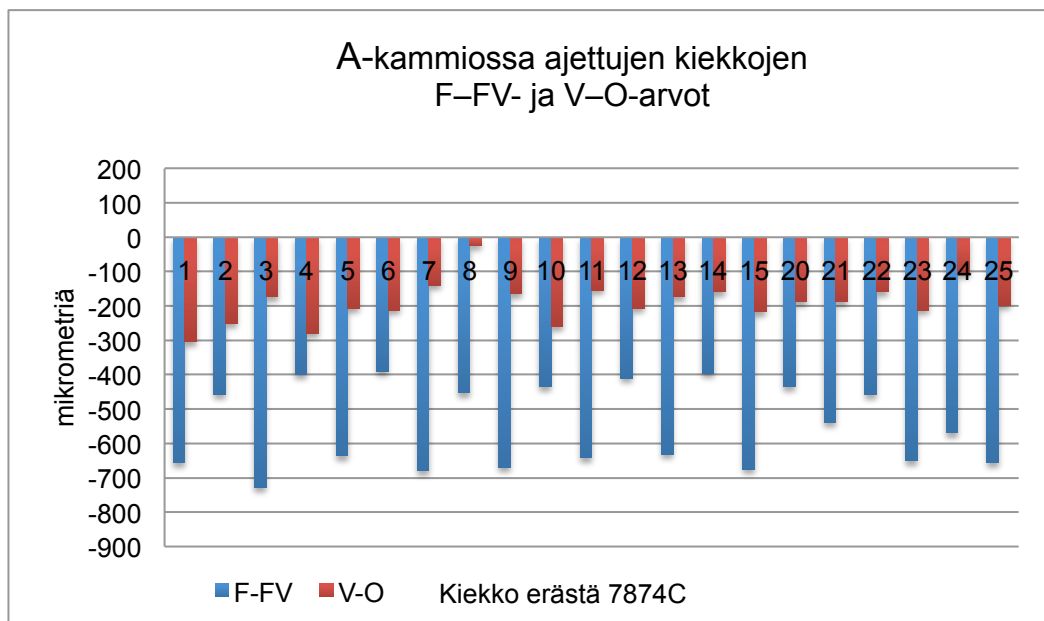


Kuva 31. A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämän leveyden vaihtelu mittapisteissä F, V, FV ja O.

Kuvasta 31 on nähtävissä, että reunajäämien leveydessä on jonkin verran vaihtelua kiekkojen välillä, erityisesti ensimmäisten kiekkojen kohdalla. Kuvassa 32 on esitetty A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot eli vastakkaisten mittapisteiden vähennyksestä saadut arvot viivadiagrammina. Jos kiekot olisivat olleet keskellä etsausalustaa, olisivat suorat asettuneet nollan lähetyville. Kuvassa 33 on esitetty sama pylväsdigrammina. Jos kiekot olisivat olleet keskellä etsausalustaa, olisivat pylväät asettuneet nollan lähetyville.

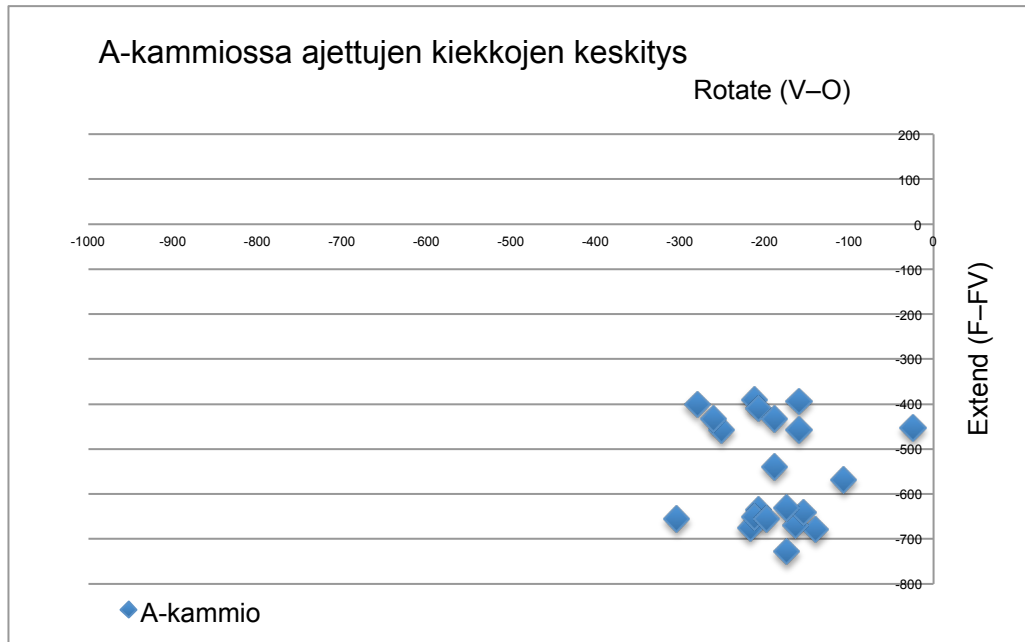


Kuva 32. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla viivadiagrammimuodossa.



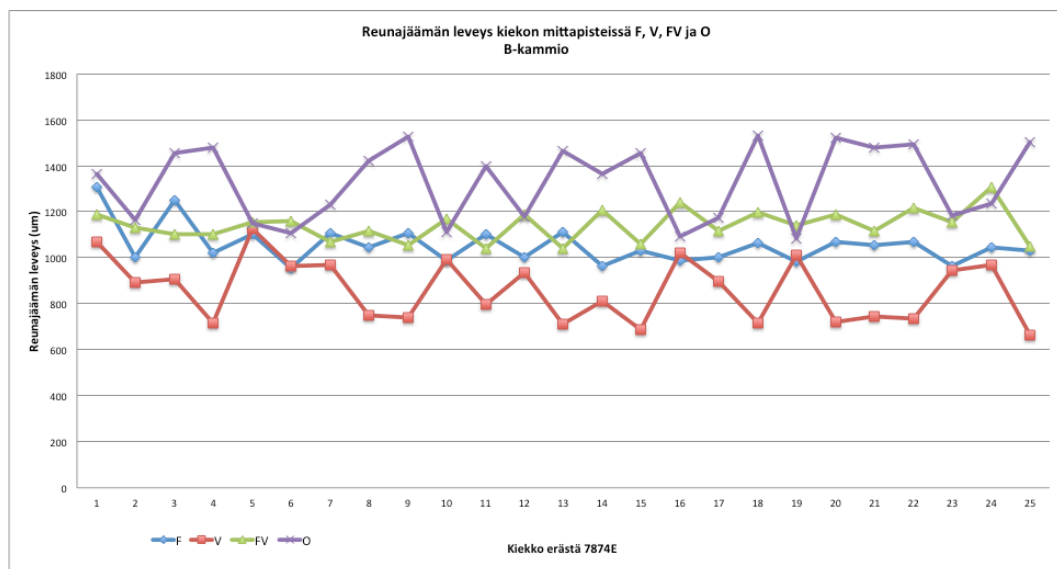
Kuva 33. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla pylväsdiagrammimuodossa.

Kuvista 32 ja 33 nähdään, että erityisesti F–FV-suunnassa on vaihtelua joka toisella kiekolla. Kuviossa 12 on esitettyä sama vielä x-y-koordinaatistossa, jossa kiekon F–FV- ja V–O-arvot ovat yhdistettyinä yhdessä pisteessä. Koordinaatistossa jokainen piste edustaa yhtä kiekkoa. Jos kiekko on ollut keskellä etsausalustaa, asettuu piste origon lähetyville. Kuvasta 34 nähdään taas, että vaihtelua esiintyy enimmäkseen F–FV-suunnassa. V–O-suunnassa vaihtelu on vähäisempää.



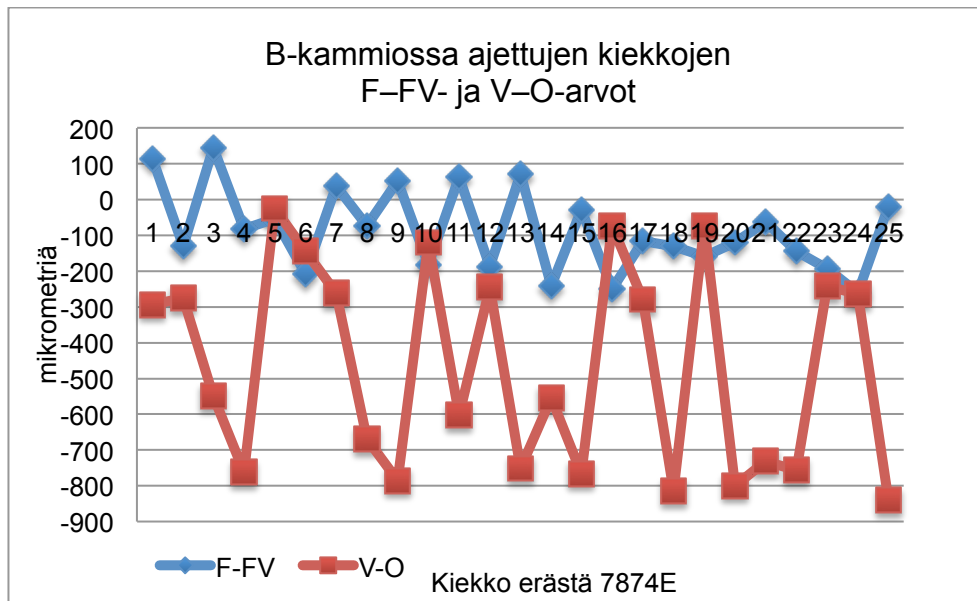
Kuva 34. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla x-y-koordinaatistomuodossa.

B-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveydet sekä niistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot on esitetty liitteessä 4: Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla Kuvassa 35 on esitetty reunajäämän leveys mittapisteissä F, V, FV ja O B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla.

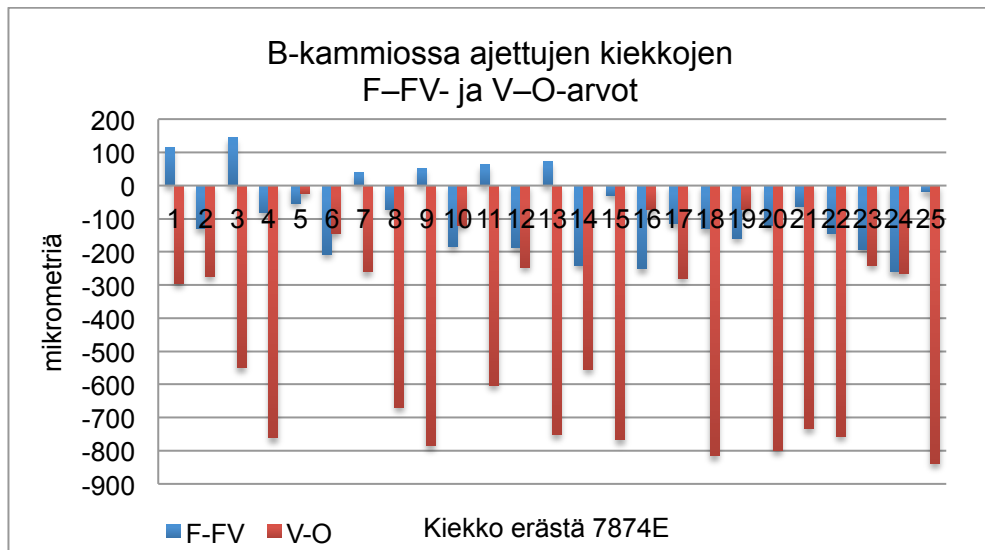


Kuva 35. Reunajäämän leveys mittapisteissä B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla.

Kuvasta 35 on nähtävissä, että vaihtelu reunajäämän leveydessä on B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla vielä suurempaa kuin A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla. Erät ajettiin eri aikaan, joten vaihtelu saattaa muuttua ajan kuluessa. Erien prosessoinnissa oli noin kuukauden ero. Kuvassa 36 on esitetty B-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot viivadiagrammina. Kuvassa 37 on esitetty sama vielä pylväsdigrammina.

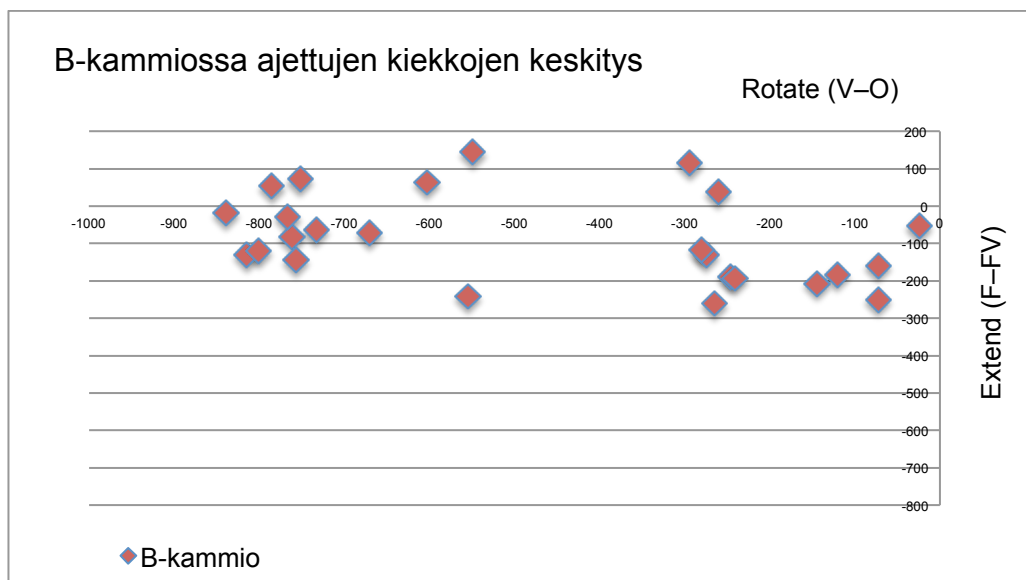


Kuva 36. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla viivadiagrammimuodossa.



Kuva 37. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla pylväsdigrammimuodossa.

Kuvista 36 ja 37 on nähtävissä, että erityisesti V–O-arvoissa on vaihtelua. F–FV-arvoissakin on hieman vaihtelua, mutta ei läheskään niin paljon kuin V–O-arvoissa. Kuviossa 38 on esitettyä sama vielä x-y-koordinaatistossa, jossa jokainen piste kuvastaa yhtä kiekkoa. Lähellä origoa olevat pisteet kuvastavat kiekkoalustan keskellä ajettuja kiekkoja.



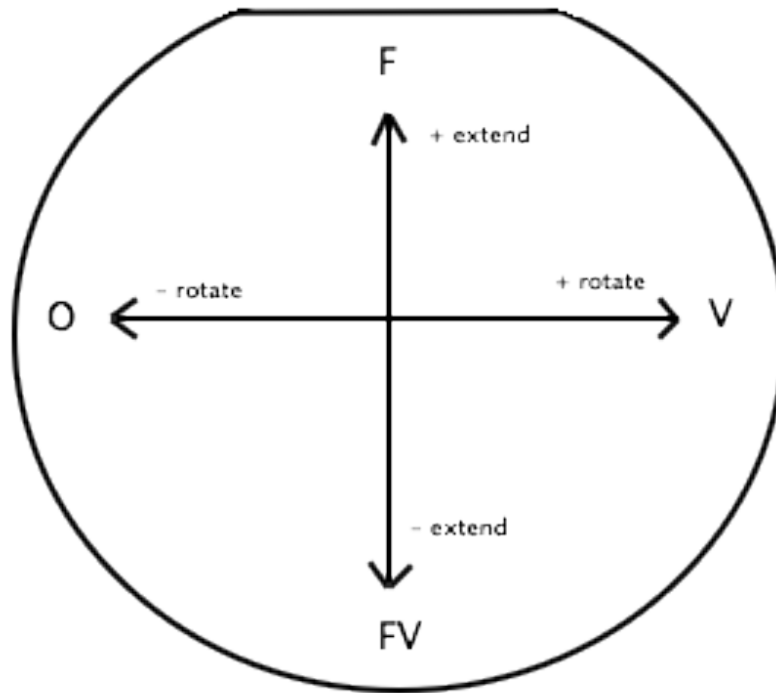
Kuva 38. F–FV- ja V–O-arvojen vaihtelu B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla x-y-koordinaatistomuodossa

Kuvasta 38 nähdään taas, että vaihtelua esiintyy erityisesti V–O-suunnassa. F–FV-suunnassa vaihtelu on huomattavasti vähäisempää. Koska molemmissa kammioissa on melko paljon vaihtelua, ei kiekon keskitystä voida määrittää vain yhden kiekon perusteella. Tästä syystä monitorointi tullaan tekemään ajamalla molempiin kammioihin kaksi kiekkoa. Tätä enempää ei kuitenkaan kannata ajaa, sillä silloin monitoroinnista tulee liian vaivalloinen suorittaa.

4.8 Käsivarren liikkeiden säätö

PERIE:n käsivarsi liikkuu eteen ja taakse sekä vasemmalle ja oikealle. Käsivarren liikkeitä hallinnoidaan extend- ja rotate-arvojen avulla. Extend-arvon säätö vaikuttaa käden liikkeisiin pituussuunnassa eli eteen ja taakse ja rotate-arvon säätö leveyssuunnassa eli vasemmalle ja oikealle. Säädettyäessä extend-arvoa vastaa 10 mittaväliä 1000:ta mikrometriä ja säädettyäessä rotate-arvoa vastaa 48 väliä 1000:ta mikrometriä.

Kiekko on etsausalustalla suorareuna ylöspäin, joten käsivarren parametrien muuttaminen tapahtuu kuvan 39 mukaisesti. [26.]



Kuva 39. Kiekon suuntaus kammiossa sekä käsivarren liikkeiden muuttaminen

Kun **extend-arvo** kasvaa, siirtyy kiekko F-pisteen suuntaan eli eteenpäin, ja kun arvo pienenee, siirtyy kiekko FV-pisteen suuntaan eli taaksepäin. Kun **rotate-arvo** kasvaa, siirtyy kiekko V-pisteen suuntaan oikealle ja kun arvo pienenee siirtyy kiekko O-pisteen suuntaan vasemmalle. Kun oletetaan, että reunajäämän leveys on jokaisessa pisteessä suurin piirtein sama kiekon ollessa keskellä kiekkoalustaa, voi kiekon keskityksen laskea vähentämällä vastakkaisten mittapisteiden reunajäämien leveydet toisistaan.

Jos kiekko on keskellä alustaa, pätee:

$$F - FV = 0$$

$$V - O = 0$$

Jos tulos on jotain muuta kuin 0:

$$F - FV = +x$$

Jos edellä olevasta laskusta saadaan tulokseksi positiivinen luku, on reunajäämä leveämpi pisteessä F kuin pisteessä FV eli piste F on ollut lähempänä reunavallia etsattaessa. Tässä tilanteessa extend-arvoa tulisi pienentää.

$$F - FV = -x$$

Jos edellä olevasta laskusta saadaan tulokseksi negatiivinen luku, on reunajäämä leveämpi pisteessä FV kuin pisteessä F eli piste FV on ollut lähempänä reunavallia etsattaessa. Tässä tilanteessa extend –arvoa tulisi kasvattaa.

$$V - O = +x$$

Jos edellä olevasta laskusta saadaan tulokseksi positiivinen luku, on reunajäämä leveämpi pisteessä V kuin pisteessä O eli piste V on ollut lähempänä reunavallia etsattaessa. Tässä tilanteessa rotate –arvoa tulisi pienentää.

$$V - O = -x$$

Jos edellä olevasta laskusta saadaan tulokseksi negatiivinen luku, on reunajäämän leveämpi pisteessä O kuin pisteessä V eli piste O on ollut lähempänä reunavallia etsattaessa. Tässä tilanteessa rotate –arvoa tulisi kasvattaa.

Kun mittaustulokset asetetaan xy-koordinaatistoon siten, että V–O-arvo on x ja F–FV-arvo on y, nähdään koordinaatistosta suoraan, missä kiekko alustalla on suhteessa keskipisteeseen.

4.8.1 Toimenpiteet

Käsivarren liikkeiden säätöä testattiin 22 kiekon avulla. Käytettävät kiekot olivat samoja Okmeticin partikkelitestikiekkoja kuin aiemminkin. Erä nimettiin eräksi 7874D ja koodattiin samalla periaatteella kuin aiemmissa kokeissa. Erän kiekkoille kasvatettiin 200 nm oksidia ja 250 nm nitridiä kuten aiemmissakin kokeissa. Käsivarren liikkeitä tutkittiin

muuttamalla liikkeitä määrittäviä rotate- ja extend-arvoja vastaamaan $\pm 500 \mu\text{m}$:n muutosta, minkä jälkeen kiekkojen reunajäämän leveys mitattiin mittapisteistä F, V, FV ja O ja katsottiin kuinka suurena muutoksena 500 mikrometrin siirto näkyi todellisuudessa kiekkoilla.

Extend-arvon säädössä 10 yksikköä vastaa 1000:ta mikrometriä. Koska liikkeitä halutaan muuttaa 500 mikrometriä, muutetaan extend-arvoa 5 yksikköä. Rotate-arvon säädössä 48 yksikköä vastaa 1000:ta mikrometriä, joten rotate-arvoa muutetaan 24 yksikköä. Laitteen alkuperäisissä asetuksissa rotate oli 24390 ja extend 4820. Taulukossa 12 on esitetty kokeiden järjestys, käytetyt kiekot ja rotate- ja extend-arvojen muutokset asetuksissa.

Taulukko 12. Kiekkojen ajojärjestys PERIE:llä ja rotate- ja extend-arvojen muutokset käsivarren liikeasetuksissa.

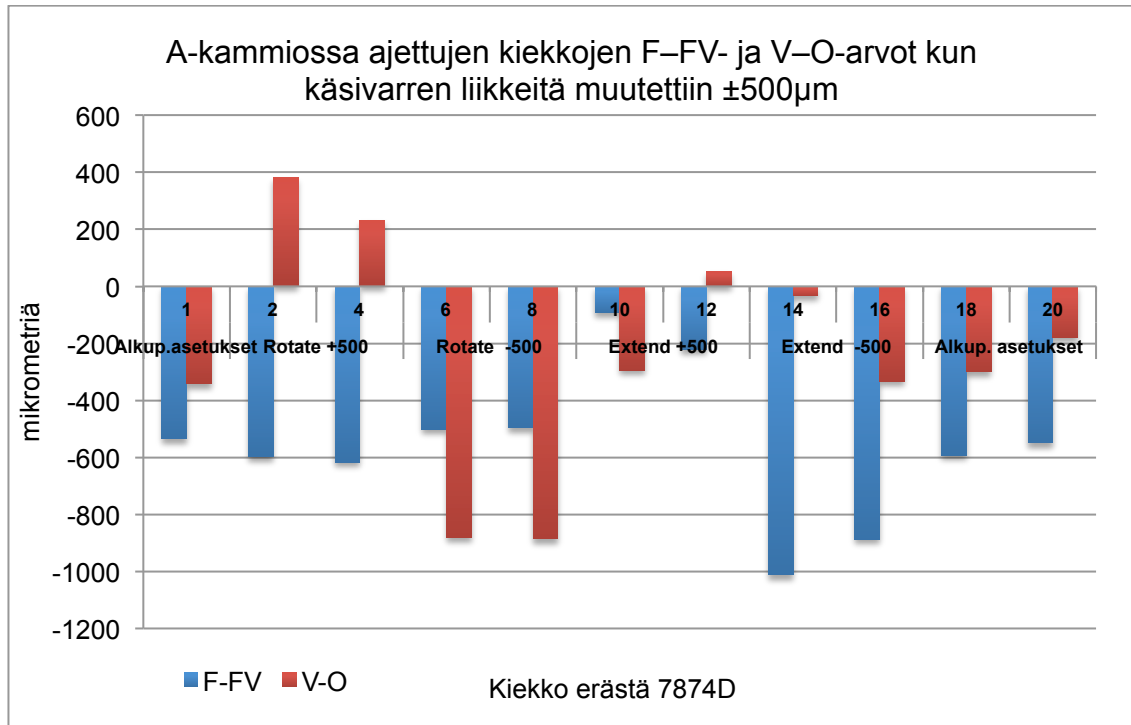
		A-kammio			B-kammio		
KOE	Tarkoitus	Kiekot	Rotate	Extend	Kiekot	Rotate	Extend
1	Alkup. asetukset	w1	24390	4820	w25	32568	13020
2	Rotate +500 mikroa	w2 w4	24395	4820	w3 w5	32573	13020
3	Rotate -500 mikroa	w6 w8	24385	4820	w7 w9	32563	13020
4	Extend +500 mikroa	w10 w12	24390	4844	w11 w13	32568	13044
5	Extend -500 mikroa	w14 w16	24390	4796	w15 w17	32568	12996
6	Alkup. asetukset	w18 w20	24390	4820	w19 w21	32568	13020

Kiekkoja oli tarkoitus ajaa kussakin kokeessa 2 kpl/kammio, mutta valitettavasti kokeessa 1 ajettiin epähuomiossa vain 1 kiekko/kammio ja vielä epäloogisesti kiekot 1 ja 25.

4.8.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

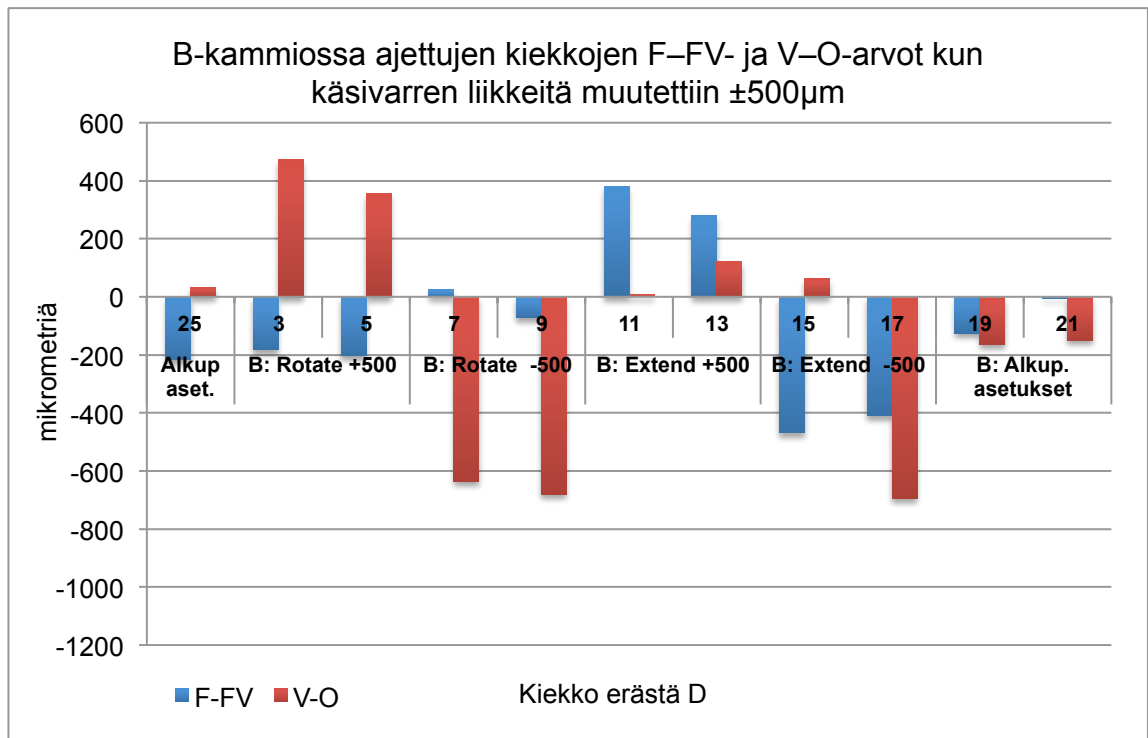
Koekiekkojen reunajäämän leveydet mittapisteissä F, V, FV ja O sekä niistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot on esitetty liitteessä 5: Kiekon keskityksen muuttuminen kun käsivarren liikkeitä hallinnoivia rotate- ja extend-arvoja muutetaan $\pm 500 \mu\text{m}$. Kun muutetaan extend-arvoa, näkyy muutos F–FV-arvoissa ja kun muutetaan rotate-arvoa näkyy muutos V–O-arvoissa. Kuvassa 40 on esitetty A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot pylväsdiagrammimuodossa, kun kiekkoa

kuljettavan käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$ eli rotate-arvoa ± 5 yksikköä ja extend-arvoa ± 24 yksikköä .



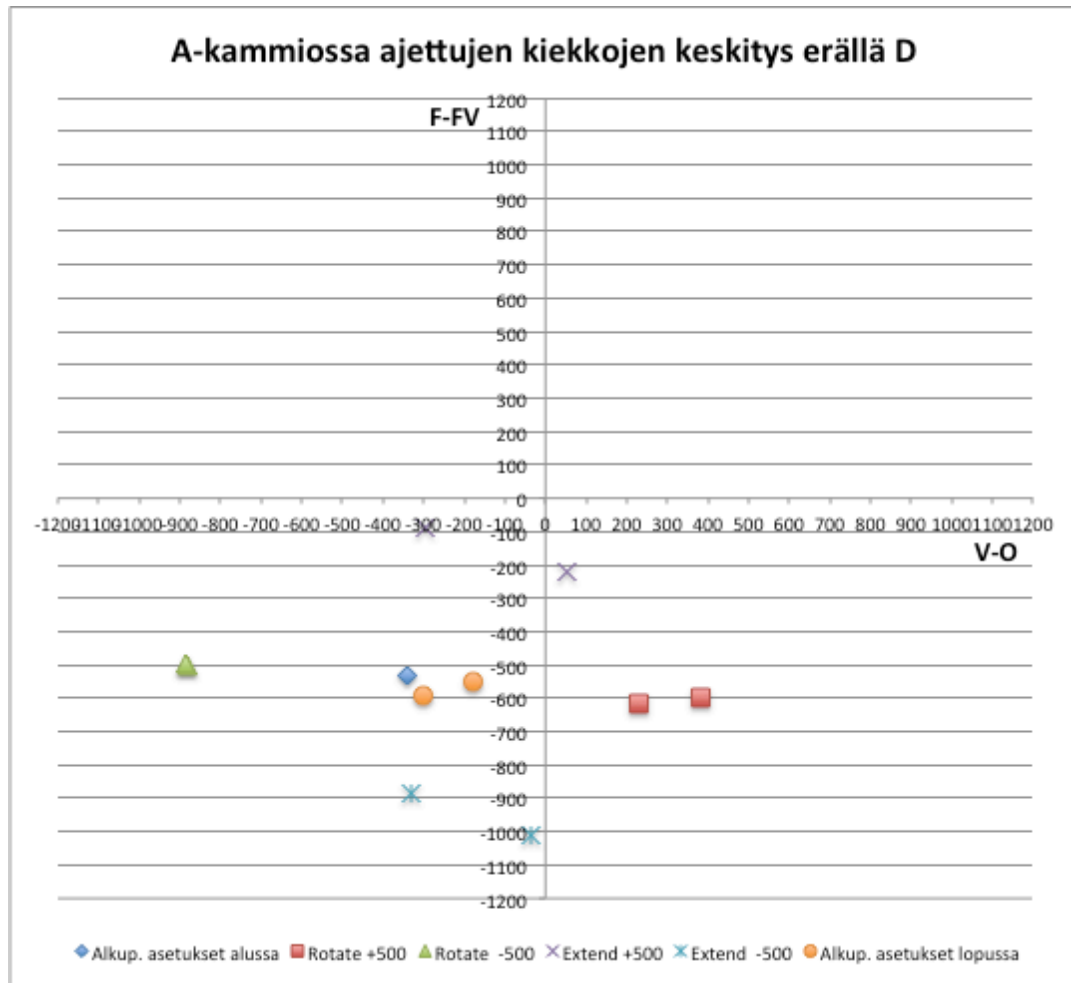
Kuva 40. Muutokset F–FV- ja V–O-arvoissa A-kammiassa ajetuilla kiekkoilla, kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Kuvassa 41 on esitetty B-kammiassa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F–FV- ja V–O-arvot pylväsdiaagrammimuodossa, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.



Kuva 41. Muutokset F–FV- ja V–O-arvoissa B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla kun käsivarren rotaate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500\mu\text{m}$.

Kuvista 40 ja 41 nähdään hyvin kiekolla näkyvä muutos F–FV- ja V–O-arvoissa, mutta kiekon keskityksen saadaan paremmin esiin asettamalla arvot xy-koordinaatistoon. Kuvassa 42 on esitetty A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F–FV ja V–O-arvot xy-koordinaatistossa.

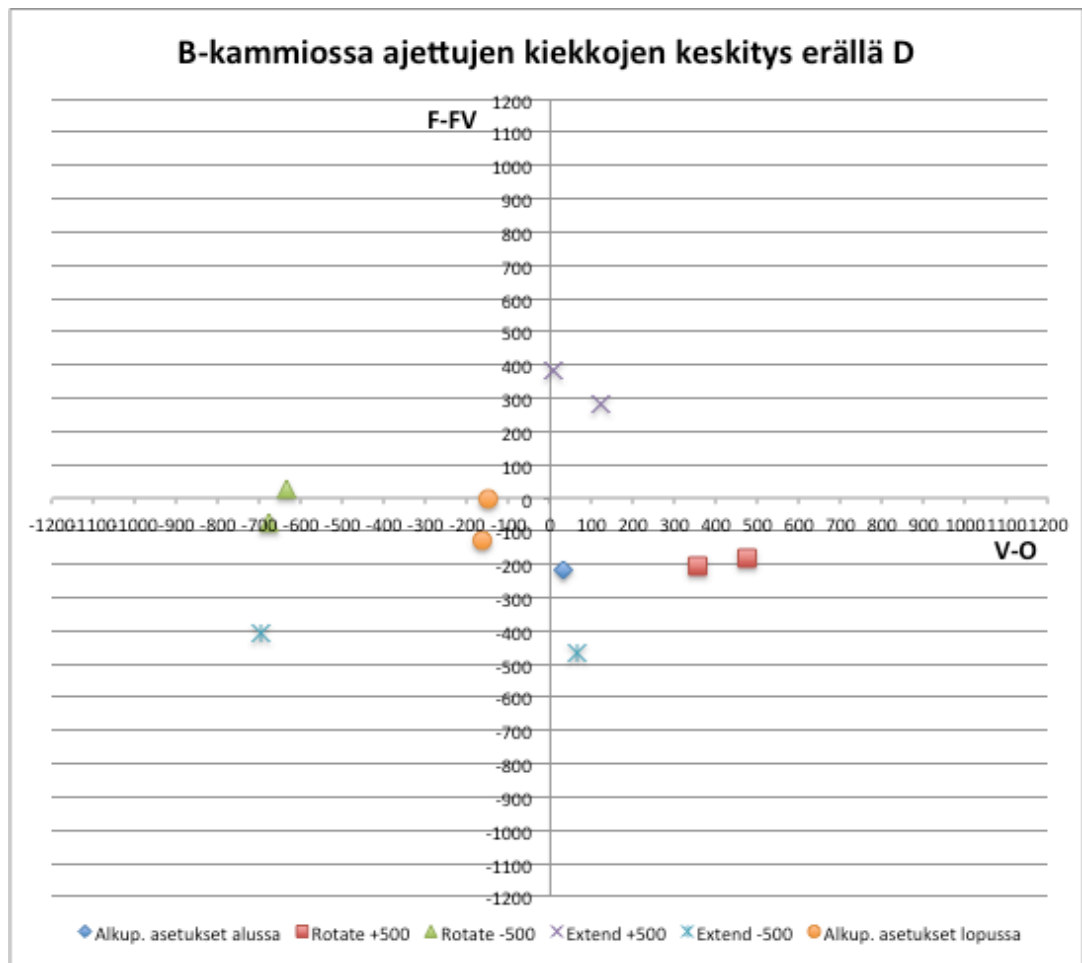


Kuva 42. A-kammiossa ajettujen koekiekkojen keskityksen muutokset, kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Kuvasta 42 nähdään kiekon keskitys alkuperäisillä asetuksilla sekä muutosten jälkeen. Jokainen piste kuvastaa yhtä kiekkoa. Jos kiekko olisi keskellä alustaa, löytyisi piste origon lähettäviltä. Kuvasta 42 nähdään, ettei kiekko ole ollut keskellä alustaa edes alkuperäisillä asetuksilla. Tästä huolimatta tuloksissa on nähtävissä oikeanlaisia muutoksia, kun rotate- ja extend-arvoja muutettiin, eli kiekon keskitys on muuttunut liikkeiden asetuksia muutettaessa ja kiekko on siirtynyt siihen suuntaan, johon sen pitikin siirtyä ja suunnilleen saman verran kuin liikkeiden asetuksia muutettiin eli noin $500 \mu\text{m}$.

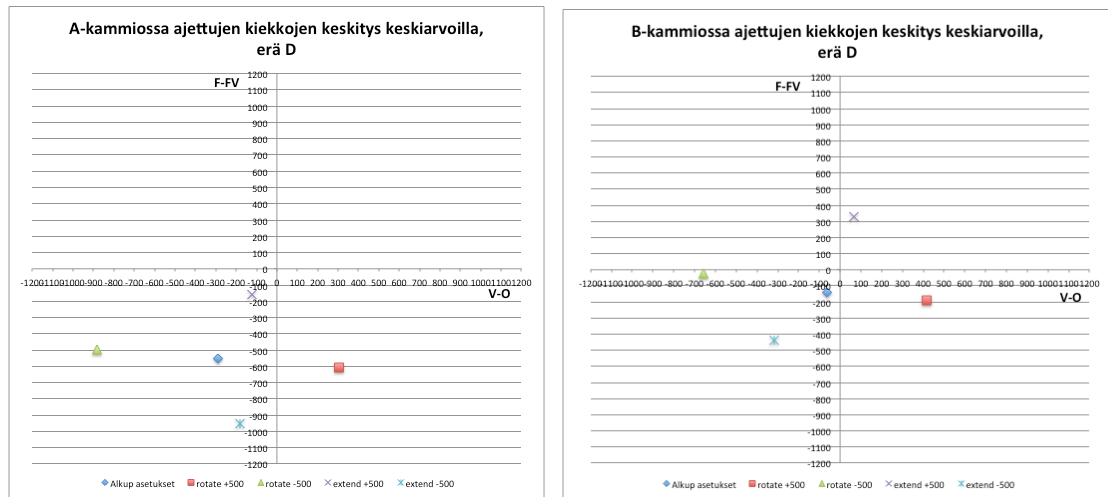
Kuvassa 43 on esitetty B-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksistä lasketut F-FV- ja V-O-arvot xy-koordinaatistossa. Kuvasta 43 nähdään, että alkuperäisillä asetuksilla olleet kiekot ovat B-kammiossa olleet melko keskellä alustaa. Muutokset rotate- ja extend-arvoihin näkyivät tämän ansiosta selkeämmin B-kammiossa ajetuilla

kiekoilla kuin A-kammiossa ja tulokset vaikuttivat hyviltä. Poikkeuksena oli kuitenkin toinen kahdesta extend -500 -kiekosta, jonka x-arvo erosi paljon toisesta.



Kuva 43. B-kammiossa ajettujen koekiekkojen keskityksen muutokset kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Kuvassa 44 on esitetty muutokset A-kammiossa ja B-kammioissa ajettujen kiekkojen keskityksessä (keskiarvoilla).



Kuva 44. Erän D koekiekkojen keskityksen muutokset keskiarvoilla laskettuina a) A-kammiossa ja b) B-kammiossa, kun laitteen käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Kuvasta 44 on mahdollista laskea alkuperäisen pisteen siirtymä Pythagoraan lauseen [27, s.] avulla:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$c = (a^2 + b^2)^{0,5}$$

c = siirtymä, a = muutos y-akselilla, b = muutos x-akselilla

Näin ollen:

$$\text{Siirtymä} = (((F - FV)_{\text{alkup.}} - (F - FV)_{\text{muutos}})^2 + ((V - O)_{\text{alkup.}} - (V - O)_{\text{muutos}})^2)^{0,5}$$

Taulukossa 13 on esitetty edellä olevalla kaavalla lasketut siirtymät. Siirtymät on laskettu kiekkojen keskiarvoilla.

Taulukko 13. Siirtymät keskiarvoilla laskettuina

Siirtymät (μm) kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$				
Kammio	rotate +500	rotate -500	extend +500	extend -500
A-kammio	598,84	595,98	431,25	410,63
B-kammio	478,72	607,72	487,77	392,12

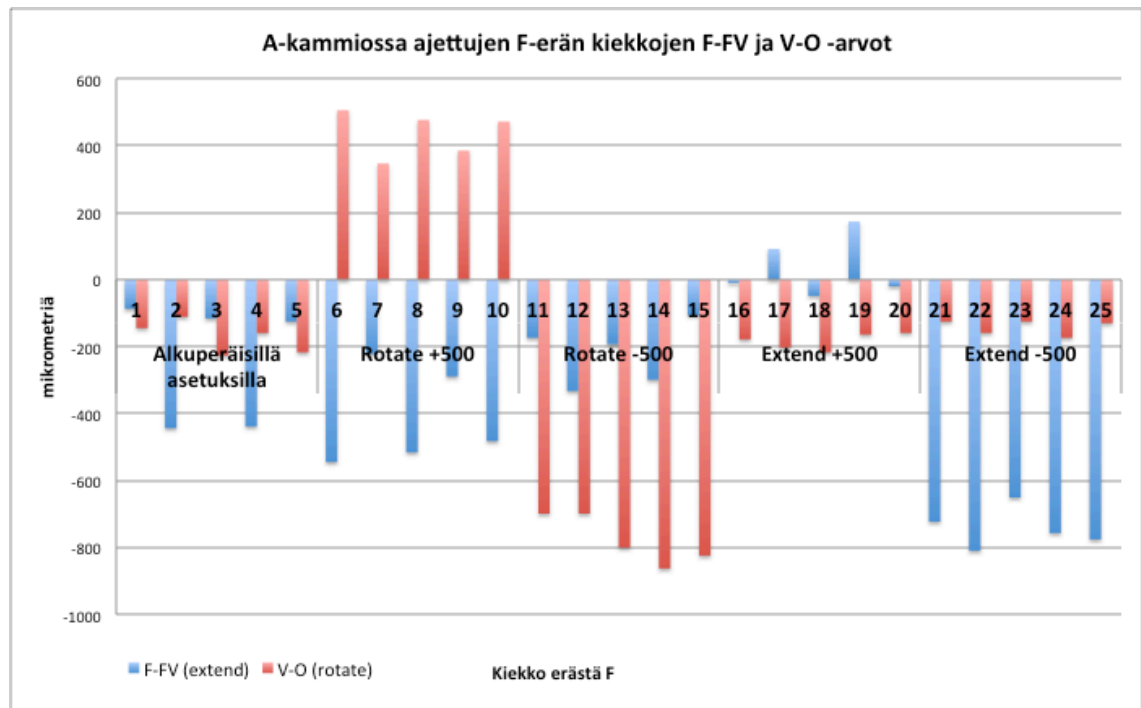
A- ja B-kammion välillä ei näyttäisi olevan suurta eroa. Kiekkojen välillä on hajontaa, ja erot siirtymissä johtuvat tästä hajonnasta.

Tulokset varmistettiin vielä toisella erällä (7874F), joka ajettiin pelkästään A-kammiossa taulukon 14 mukaan.

Taulukko 14. Suunnitelma kiekkojen ajamisesta PERIE:llä A-kammiossa, kun käsivarren rotate- ja extend-arvoa muutetaan $\pm 500 \mu\text{m}$.

KOE	Tarkoitus	Kiekot	Rotate	Extend
1	alkup. aset.	1-5	24390	4820
2	rotate +500	6-10	24395	4820
3	rotate -500	11-15	24385	4820
4	extend +500	16-20	24390	4844
5	extend -500	21-25	24390	4796

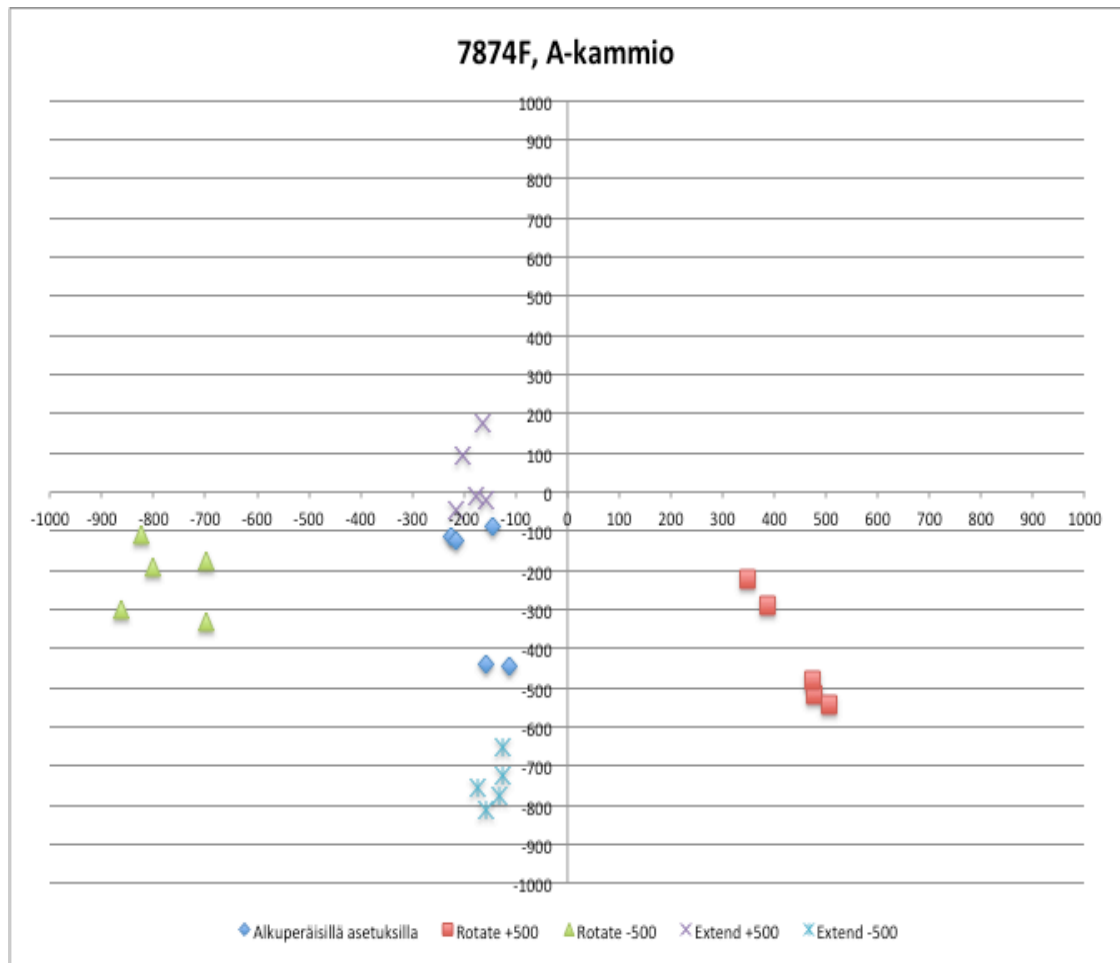
Mittaustulokset sekä niistä lasketut F-FV- ja V-O-arvot on esitettyinä liitteessä 5: Kiekon keskityksen muuttuminen kun käsivarren liikkeitä hallinnoivia rotate- ja extend-arvoja muutetaan $\pm 500 \mu\text{m}$. Kuvassa 45 on esitetty muutokset pylväsdiagrammimuodossa.



Kuva 45. Muutokset F-FV- ja V-O-arvoissa erällä 7874F kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

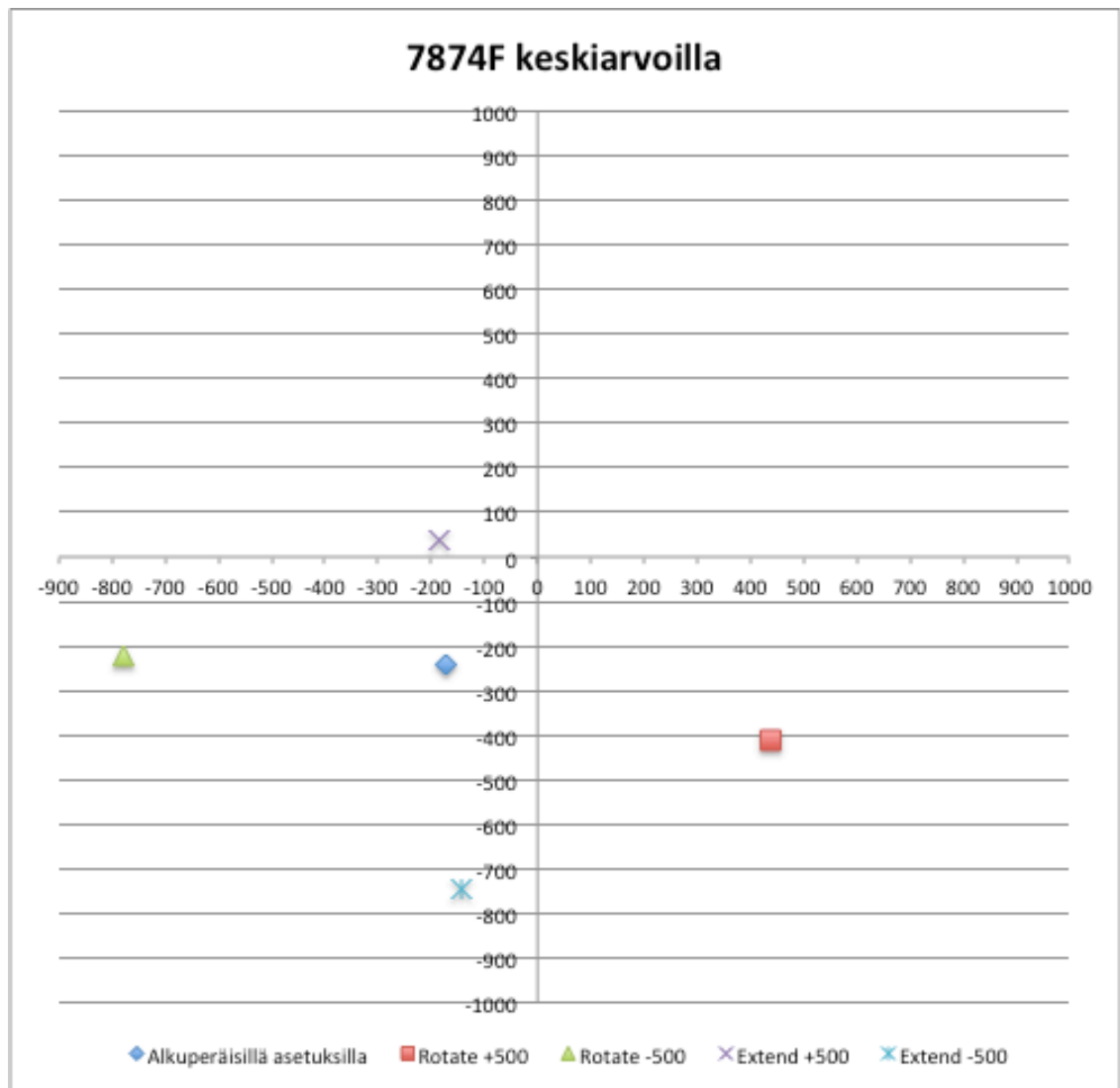
Kuvasta 45 nähdään, että erän sisällä esiintyy melko paljon vaihtelua F–FV- ja V–O-arvoissa. Vaihtelu on laitteen normaalia vaihtelua ja se pitää pystyä ottamaan huomioon monitorointimenetelmässä.

Kuvassa 46 on esitetty erän 7874F kiekkojen keskitys x-y-koordinaatistossa, kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.



Kuva 46. Muutokset keskityksessä erän 7874F kiekkoilla kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Kuvasta 46 nähdään, kuinka kiekkojen välillä on vaihtelua erityisesti y-akselin suunnassa. Kuvassa 47 on esitetty tulokset kiekkojen keskiarvoilla.



Kuva 47. Muutokset keskityksessä erällä 7874F, kun käsivarren rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$ (keskiarvoilla laskettuna).

Kuvasta 47 nähdään, että muutokset olivat suunnilleen samaa luokaa kuin aiemmin, paitsi extend +500 -muutoksen kohdalla. Tämä saattoi johtua kiekolla olevasta suorasta reunasta. Vaikka myös uniformity ringillä on yksi suora reuna, saattaa plasma käyttäytyä hieman erilailla suoralla reunalla kuin muilla reunoilla, jotka ovat kaarevia. Näiden tulosten perusteella muutokset extend- ja rotate-arvoissa vastaavat suurin piirtein todellisuudessa tapahtuvaa muutosta.

4.9 Käden liikkeiden muuttaminen mittaustulosten perusteella

Jotta käden liikkeiden muuttaminen olisi mahdollisimman yksinkertaista, luotiin mittaukselle automaattinen siirtolaskuri, joka kertoo suoraan mittaustulosten syöttämisen jälkeen, kuinka paljon käden rotate- ja extend-arvoja tulisi muuttaa.

4.9.1 Toimenpiteet

Aiemmin todetun vaihtelun perusteella monitoroinnissa päätettiin käyttää yhteensä neljää monitorointikiekkoa eli molempiin kammioihin tullaan aina ajamaan kaksi kiekkoa. Kun kiekot on prosessoitu ja mitattu, syötetään tulokset luotuun Excel-tilukseen. Taulukkoon luotiin kentät F–FV- ja V–O-arvojen automaattiseen laskemiseen tulosten perusteella sekä kuvaajat, jotka näyttävät kiekkojen keskityksen x-y-koordinaatistossa. Taulukkoon luotiin myös kentät, jotka näyttävät automaattisesti, kuinka paljon rotate- ja extend-arvoja tulee tulosten perusteella muuttaa. Excel-tilukko on kuvassa 48.

PERIEn käsivarren liikkeiden säätö

A-kammio	F	V	FV	O
A1	1089,14	881,92	1460,22	1493,96
A2	1132,52	930,11	1513,24	1575,89

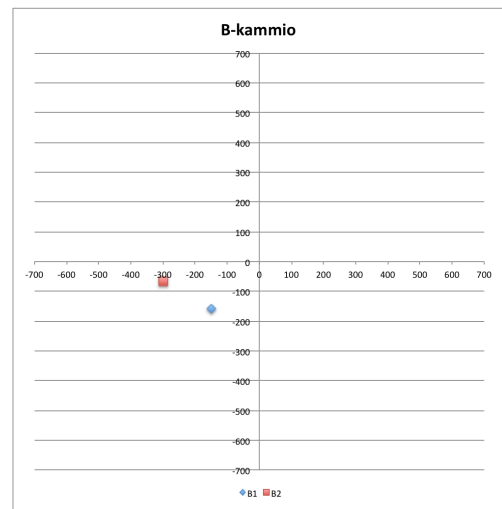
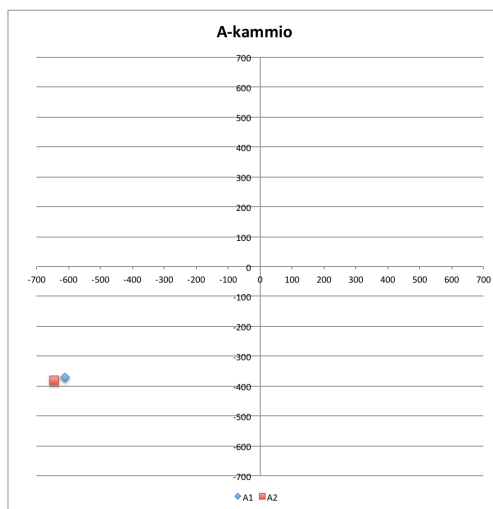
V-O (x)	F-FV (y)
-612,04	-371,08
-645,78	-380,72

A-kammio	Muutos
Rotate	6
Extend	18

B-kammio	F	V	FV	O
B1	934,93	949,39	1093,96	1098,78
B2	997,58	896,38	1065,05	1195,17

V-O (x)	F-FV (y)
-149,39	-159,03
-298,79	-67,47

B-kammio	Muutos
Rotate	2
Extend	5



Kuva 48. Muutoslaskuri käden liikkeiden muuttamisesta mittaustulosten perusteella.

Käsivarren liikkeiden muuttaminen lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$Rotate = \frac{\left(\frac{(V1-O1)+(V2-O2)}{2}\right)}{-1000} * 10$$

$$Extend = \frac{\left(\frac{(F1-FV1)+(F2-FV2)}{2}\right)}{-1000} * 48$$

Edellä olevista kaavoista saadaan tulokseksi, kuinka monta mittayksikköä käsivarren liikeasetuksia tulisi muuttaa.

4.9.2 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Muutoslaskurin toimivuutta testattiin prosessoimalla ensin kaksi kiekkoa A-kammiossa ja kaksi B-kammiossa. Kiekkojen reunajäämien leveydet mittapisteissä F, V, FV ja O mitattiin ja mittaustulokset syötettiin muutoslaskuriin. Tämän jälkeen kiekkoja kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin muutoslaskurin mukaan ja uusilla liikeparametreilla prosessoitiin kaksi kiekkoa A-kammiossa ja kaksi B-kammiossa. Taulukossa 15 on esitetty mittaustulokset reunajäämien leveyksistä ennen käsivarren liikkeiden muuttamista ja taulukossa 16 liikkeiden muuttamisen jälkeen.

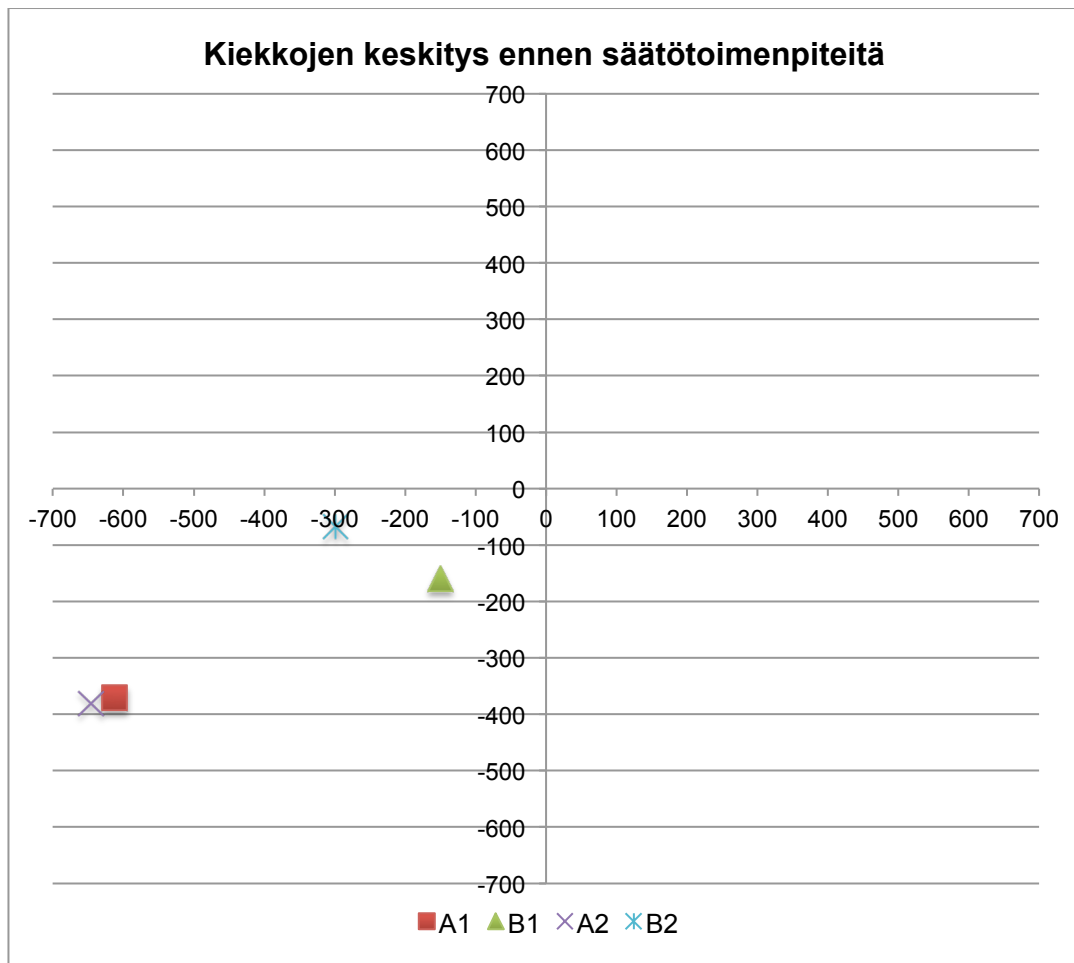
Taulukko 15. Reunajäämien leveydet mittapisteissä ennen käsivarren liikkeiden muuttamista

Kiekko	F	V	FV	O	V-O (x)	F-FV (y)
A1	1089,14	881,92	1460,22	1493,96	-612,04	-371,08
B1	934,93	949,39	1093,96	1098,78	-149,39	-159,03
A2	1132,52	930,11	1513,24	1575,89	-645,78	-380,72
B2	997,58	896,38	1065,05	1195,17	-298,79	-67,47

Taulukko 16. Reunajäämien leveydet mittapisteissä käsivarren liikkeiden muuttamisen jälkeen

Kiekko	F	V	FV	O	V-O (x)	F-FV (y)
A1	1146,97	1219,26	1368,66	1272,27	-53,01	-221,69
B1	901,19	1103,6	1098,78	930,11	173,49	-197,59
A2	1224,08	1161,43	1359,02	1378,3	-216,87	-134,94
B2	944,57	1190,35	1089,14	901,19	289,16	-144,57

Kuvassa 49 on esitetty kiekkojen keskitys x-y-koordinaatistossa ennen säätötoimenpiteiden tekemistä.



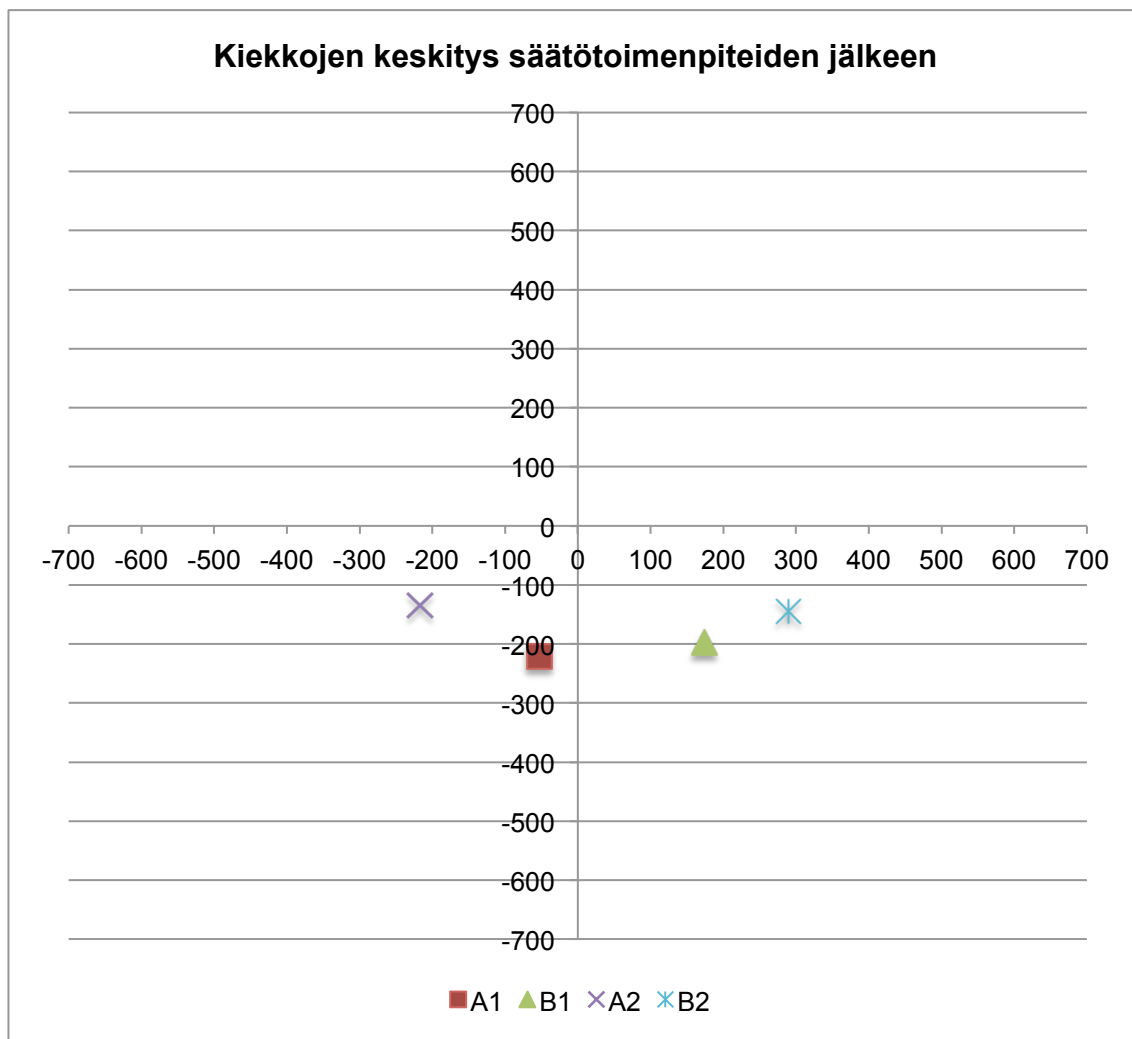
Kuva 49. Kiekkojen keskitys A- ja B-kammiossa ennen käsivarren liikeasetusten muuttamista.

Muutoslaskurin mukaan käsivarren liikkeitä piti muuttaa taulukon 17 mukaan.

Taulukko 17. Tarvittava muutos PERIE:n käsivarren rotate- ja extend-arvoihin kiekkojen keski-tyksen parantamiseksi.

Muutos liikkeissä	A-kammio	B-kammio
Rotate	6	2
Extend	18	5

Kuvassa 50 on esitetty kiekkojen keskitys käsivarren liikeasetusten muuttamisen jälkeen.



Kuva 50. Kiekkojen keskitys A- ja B-kammiossa käsivarren liikeasetusten muuttamisen jälkeen.

Kuvasta 50 nähdään, että kiekkojen keskitys on muuttunut siihen suuntaan kuin oli tarkoituskin. Kiekkojen keskitys oli alun perin melko hyvä B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla, joten käsivarren liikkeitä B-kammioon ei välttämättä olisi tarvinnut muuttaa. Niitä kuitenkin muutettiin ja tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että muutos olisi saanut olla rotate-suunnassa puolet pienempi ja extend-suunnassa puolet suurempi, kuin mitä tehtiin. A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla oli alun perin melko huono keskitys, mutta käsivarren liikeasetusten muuttamisen jälkeen ajetuilla kiekkoilla keskitys oli todella hyvä. Muutoslaskuri toimi siis hyvin A-kammion tapauksessa. Molempien kammioiden keskitys on joka tapauksessa muutoksen jälkeen hyvällä mallilla, eikä näillä liikeasetuksilla ajetuilla tuotantokiekoilla todennäköisesti näkyisi reunajäämää. Tarkkojen muutostöiden selvittämiseksi on kuitenkin tarpeellista kerätä enemmän dataa pitkältä aikaväliltä, jotta keskityksen vaihtelu saadaan selville ja muutoslaskurin tarkkuus voidaan lopullisesti selvittää sekä laskurin kaavoja tarvittaessa muuttaa.

5 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli luoda PERIE-laitteistolle monitorointimenetelmä, jolla on mahdollista seurata kiekon keskitystä etsauskammiossa. Menetelmän tuli olla yksinkertainen ja tuotantoa tekevien operaattoreiden piti pystyä suorittamaan monitorointitoimenpiteet normaalin tuotannon ohella. Menetelmää varten luotiin monitorointiekko, jolle kasvatetaan 200 nm oksidia ja 250 nm nitridiä. Kiekko etsataan PERIE:lle luodulla ohjelmalla, joka jättää kiekolle nähtävän ja mitattavissa olevan reunakaistaleen. Reunakaistaleen leveyttä mitataan neljästä pisteestä kiekon vastakkaisilta reunoilta ja mittaustulokset syötetään tulosten analysointipohjaan. Lopputuloksena saadaan kiekon keskitys x-y-koordinaatistossa kuvattuna sekä tieto, kuinka paljon käsivarren liikeasetuksia tulisi muuttaa. Keskityksen vaihtelun takia menetelmässä prosessoidaan kaksi kiekkoa per kammio ja keskitys määritetään käyttäen kahden kiekon keskiarvoa.

Insinööriyö rajattiin menetelmän luomiseen, eikä sen käyttöönottoa otettu mukaan. Tällä hetkellä monitorointimenetelmä on tiedonkeruuvaiheessa, jossa monitorointitoimenpiteet tehdään säännöllisin väliajoin ja tulokset tallennetaan, mutta PERIE:n käsivarren liikeasetuksia ei muuteta niiden mukaan. Tarkoituksena on aluksi vain kerätä tietoa riittävän pitkältä aikaväliltä, jotta nähtäisiin todellinen vaihtelun kiekon keskityksessä. Myös speksi- ja kontrollirajat, jotka keskitykselle tulevaisuudessa tulevat, vaativat enemmän dataa määrittämistä varten. Tavoitteena on ottaa menetelmä tuotannon käyttöön, kun vaadittava data on kerätty.

Lähteet

- 1 MEMS-teknologia. 2013. Murata Electronics Oy. Verkkodokumentti.
<<http://www.muratamems.fi/fi/murata/murata-electronics-oy/mems-teknologia>>. Luettu 18.11.2013.
- 2 Anturi. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Anturi>>. Päivitetty 9.3.2013. Luettu 18.11.2013.
- 3 Saarelainen Heikki. 2012. Automaatiotekniikan perusteet. Luento 2: Ohjaustekniikka- ja kappaletavara-automaatio. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Mikrosysteemit. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Mikrosysteemit>>. Päivitetty 14.1.2014. Luettu 30.1.2014.
- 5 A Beginner's Guide to MEMS Processes. 2013. Verkkodokumentti. MEMS and Nanotechnology Exchange (MNX).
<<https://www.memsnet.org/about/processes/>>. Luettu 14.1.2014.
- 6 A Beginner's Guide to MEMS Processes: Deposition Process. 2013. Verkkodokumentti. MEMS and Nanotechnology Exchange (MNX).
<<https://www.memsnet.org/about/processes/deposition.html>>. Luettu 14.1.2014.
- 7 CVD. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/CVD>>. Päivitetty 14.3.2013. Luettu 14.1.2014.
- 8 Ohutkalvon kasvatus. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Ohutkalvon_kasvatus>. Päivitetty 23.4.2013. Luettu 14.1.2014.
- 9 A Beginner's Guide to MEMS Processes: Lithography Process. 2013. Verkkodokumentti. MEMS and Nanotechnology Exchange (MNX).
<<https://www.memsnet.org/about/processes/lithography.html>>. Luettu 14.1.2014.
- 10 Xiao, Hong. 2001. Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology. New Jersey: Prentice Hall.
- 11 A Beginner's Guide to MEMS Processes: Etching Process. 2013. Verkkodokumentti. MEMS and Nanotechnology Exchange (MNX).
<<https://www.memsnet.org/about/processes/etch.html>>. Luettu 14.1.2014.
- 12 Nayak, A.P., VJ, L., Islam, M.S. Wet and Dry Etching. Verkkodokumentti. University of California.

- <http://www.ece.ucdavis.edu/~anayakpr/Papers/Wet%20and%20Dry%20Etching_submitted.pdf>. Luettu 15.2.2014.
- 13 Isotropy. 2014. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Isotropy>>. Last modified 6 March 2014. Luettu 7.4.2014.
 - 14 Etsaus (valmistustekniikka). 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<[http://fi.wikipedia.org/wiki/Etsaus_\(valmistustekniikka\)](http://fi.wikipedia.org/wiki/Etsaus_(valmistustekniikka))>. Päivitetty 16.3.2013. Luettu 15.2.2014.
 - 15 Etching (microfabrication). 2014. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Etching_\(microfabrication\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Etching_(microfabrication))>. Last modified 23 February 2014. Luettu 15.2.2014.
 - 16 Reactive-ion etching. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Reactive-ion_etching>. Updated 26 October 2013. Luettu 15.2.2014. : 2.5.3 ja 4.0
 - 17 May, Gary s., Spanos, Costas J. 2006. Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
 - 18 Salomäki, Rauno. 1999. Suorituskykyiset prosessit - hyödynnä SPC. Toinen uudistettu painos. Tampere: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
 - 19 Laitinen, Kai. 2013. Kunnossapitotekniikka. Kurssimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
 - 20 O'leary, Philip. Kokkala, Tuomo. 2013. Fundamentals of Statistical Methods. FSM16-kurssimateriaali. Murata Electronics Oy. Kurssi järjestetty syksyllä 2013.
 - 21 Measurement System Analysis. 2014. Verkkodokumentti. MoreSteam.
<<https://www.moresteam.com/toolbox/measurement-system-analysis.cfm>>. Luettu 27.2.2013.
 - 22 ICP-RIE. 2013. Verkkodokumentti. Wikimedia Foundation.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/ICP-RIE>>. Päivitetty 5.4.2013. Luettu 15.2.2013.
 - 23 Jani Peltola. Prosessikontrolli-insinööri, Murata Electronics Oy. Keskustelu 27.6.2013.
 - 24 Measurement System Analysis. 2013. MSA-ohjeet. Murata Electronics Oy.
 - 25 AIAG MSA-4. 2010. Measurement System Analysis, MSA, Reference Manual, Fourth edition. Automotive Industry Action Group.

- 26 Kenneth Lönqvist. Vanhempi laiteinsinööri, Murata Electronics Oy. Keskustelu 5.9.2013.
- 27 Seppänen, Raimo. 2005. Maol-taulukot, matematiikka. 2.-4. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

Monitorointiohjelman määrittämiseen käytetyt prosessiparametrit sekä havainnot testiajoista

Taulukossa on esitetty monitorointiohjelman selvittämisessä tehtyjen etsausohjelmien asetukset sekä havainnot kiekkoilla nähdyistä muutoksista ajojen jälkeen.

Kiekko	Etsausohjelma	Kiekon ulkonäkö ajon jälkeen	Time (s)	Delay (s)	Over etch	Level threshold (%)
A1	PAFI_OXNIT250	Kiekko on kellertävä, mutta sillä on kapea (n. 1 mm) sinipunainen reunus.	150	10	10	25
A9	PAFI_OXNIT100	Kiekko on kellertävä, mutta sillä on todella kapea (< 1 mm) sinipunainen reunus.	150	10	10	25
A10	PAFI_OXNIT100	Kiekko on kellertävä, mutta sillä on todella kapea (< 1 mm) sinipunainen reunus.	100	10	10	25
A17	PAFI_OX200	Kiekolle ei jäänyt mitään.	180	30	5	20
A18	PAFI_OX200	Kiekolle ei jäänyt mitään.	180	30	5	20
A19	PAFI_OX200	Kiekolle ei jäänyt mitään.	100	12	0	10
A20	PAFI_OX200	FV-reunaan jäi ihan vähän mustaa (< 1 mm).	100	12	0	10
B1	PAFI_NOT250	Kiekolle jäi kapea (n. 1mm) rusehtavan musta reunus.	90	20	0	10
B10	PAFI_OX800	Kiekko on keskeltä kellertävä, mutta sillä on reunalla leveä (n. 1 cm) sinertävä kaistale.	100	12	0	10
B11	PAFI_OX800	Kiekolla on vaalea keskusta, mutta se tummenee reunaa kohti mentäessä. Aivan kiekon reunalla on kuitenkin leveä (n. 1 cm) vaalea kaistale.	120	12	0	10
B12	PAFI_OX800	Kiekko on piin värinen, mutta sen reunalla on leveä (n. 1 cm) vaalea kaistale.	140	12	0	10
B13	PAFI_OX800	Kiekko on piin värinen, mutta sen reunalla on leveä (n. 1 cm) vaalea kaistale.	132	12	0	10

B17	PAFI_NIT100	Kiekolle ei jäänyt mitään.	90	20	25	25
B18	PAFI_NIT100	FV-reunalle jäi kapea (< 1 mm) rusehtava reunus.	90	20	0	25
B19	PAFI_NIT100	Kiekon reunalle jäi kapea rusehtava reunus, joka on leveimmillään FV-reunassa ja ohuimmillaan F-reunassa.	90	20	0	10
B20	PAFI_NIT100	Kiekon reunalle jäi kapea rusehtava reunus, joka on leveimmillään FV-reunassa ja ohuimmillaan F-reunassa.	90	20	0	5

Mittausohjeet operaattoreille Gage R&R -menetelmää varten

PERIEn monitorikiekkojen mittaus

1. Ota mitattava kiekko ja aseta se kiekkoalustalle, johon on laitettu suorareunan kohdalle metalliset pysäytystapit. Katso, että suorareuna osuu molempiin tappeihin ja kiekko on suorassa. Aseta sitten alusta kiekkoineen mikroskoopille. Varo, ettei kiekko liiku alustalla!
2. Laita mikroskoopista kamera päälle, valotus pienimmälle ja A.S. "täysille". Aseta alusta alussa niin, että flätti osoittaa suoraan oikealle.
3. Mittaus aloitetaan suorareunasta. Valitse kameran näytöltä oikeasta alareunasta M ja vasempaan yläkulmaan aukeavasta ikkunasta TOOL sekä alle aukeavasta valikosta #C. Msr. Näytölle ilmestyvää ristikköä käytetään mittauksen apuna. Kiekot mitataan 2,5x suurennoksella.
4. Mene suorareunassa olevan mittauskohtamerkin kohdalle ja suorista alustaa niin, että kiekon reuna on suorassa verrattuna punaisiin apuviivoihin kameran näytöllä. Kun kiekko on suorassa, vedä pystysuorat punaiset apuviivat hiiren avulla kiekon reunaan sekä tummaan ohueen viivaan, joka näkyy sateenkaarireunan vasemmalla puolella. Kiekkoista mitataan sateenkaarireunan leveyttä. Tarkenna kuvaa niin, että ohut tumma viiva näkyy mahd. tarkkana. Mittaustulos on X:n ilmoittama lukema.

HUOM! Varmista, että TOOL-valikon alareunasta on valittuna m1 (vastaa 2,5x suurennosta).
5. Jatka mittaamista pyörittämällä alustaa vastapäivään eli mittaat ensin suorareunan, sitten vasemman reunan, sitten suorareunan vastakkaisen reunan ja lopuksi oikean reunan. Tee mittaus aina merkityn mittauspisteen kohdalta.
6. Toista mittaukset kolme kertaa niin, että poistat kiekon alustalta mittausten välissä.

Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n A-kammiossa ajetuilla kiekkoilla

Ajettu koko erä 7874C (21 kiekkoa) A-kammiossa 1.10.2013

rotate 24390

extend 4820

Reunajäämän leveys mittapisteissä erän 7874C kiekkoilla (µm)				
Kiekkonro.	Mittapisteet kiekon reunalla			
	F	V	FV	O
1	1065,05	1224,08	1720,46	1527,69
2	1387,94	1513,24	1845,76	1763,83
3	1069,87	1325,29	1797,57	1498,78
4	1359,02	1455,40	1759,02	1734,92
5	1127,70	1320,47	1763,83	1527,69
6	1291,55	1421,57	1681,91	1633,72
7	1074,69	1325,29	1754,20	1465,04
8	1228,90	1479,50	1681,91	1503,60
9	1069,87	1306,01	1739,74	1469,86
10	1166,25	1296,37	1599,98	1556,61
11	1098,78	1310,83	1739,74	1465,04
12	1161,43	1267,46	1571,07	1474,68
13	1069,87	1262,84	1701,19	1436,13
14	1137,34	1228,90	1532,51	1387,94
15	1069,87	1253,00	1744,56	1469,86
20	1122,88	1204,81	1556,61	1392,75
21	1122,88	1209,62	1662,63	1397,57
22	1098,78	1214,44	1556,61	1373,48
23	1069,87	1199,99	1720,46	1412,03
24	1050,59	1243,36	1619,26	1349,38
25	1050,59	1199,99	1706,00	1397,57
Keskiarvot	1137,80	1298,21	1688,33	1487,53

Erän 7874C F-FV ja V-O -arvot		
Kiekkonro.	F-FV	V-O
1	-655,41	-303,61
2	-457,82	-250,59
3	-727,7	-173,49
4	-400	-279,52
5	-636,13	-207,22
6	-390,36	-212,15
7	-679,51	-139,75
8	-453,01	-24,1
9	-669,87	-163,85
10	-433,73	-260,24
11	-640,96	-154,21
12	-409,64	-207,22
13	-631,32	-173,29
14	-395,17	-159,04
15	-674,69	-216,86
20	-433,73	-187,94
21	-539,75	-187,95
22	-457,83	-159,04
23	-650,59	-212,04
24	-568,67	-106,02
25	-655,41	-197,58
ka.	-550,54	-189,32

Reunajäämän leveyden vaihtelu PERIE:n B-kammiossa ajetuilla kiekkoilla

Ajettu koko erä 7874E (25 kiekkoa) B-kammiossa 17.11.2013

Rotate 32568

Extend 13020

Reunajäämän leveys mittapisteissä erän 7874E kiekkoilla (µm)				
Kiekkonro.	Mittapisteet			
	F	V	FV	O
1	1306,01	1069,87	1190,35	1363,84
2	1002,40	891,56	1132,52	1166,25
3	1248,18	906,01	1103,60	1455,40
4	1021,67	718,06	1103,60	1479,50
5	1103,60	1127,70	1156,61	1151,79
6	954,21	963,84	1161,43	1108,42
7	1108,42	968,66	1069,87	1228,90
8	1045,77	751,80	1118,06	1421,67
9	1108,42	742,16	1055,41	1527,69
10	987,94	992,76	1171,07	1113,24
11	1103,60	795,17	1040,95	1397,57
12	1002,40	934,93	1190,35	1180,71
13	1113,24	713,24	1040,95	1465,04
14	963,84	809,63	1204,81	1363,84
15	1031,31	689,15	1060,23	1455,40
16	987,94	1021,67	1238,54	1093,96
17	1002,40	896,38	1118,06	1175,89
18	1065,05	718,06	1195,17	1532,51
19	983,12	1012,04	1142,16	1084,32
20	1069,87	722,88	1190,35	1522,87
21	1055,41	746,98	1118,06	1479,50
22	1069,87	737,34	1214,44	1493,96
23	963,84	944,57	1156,61	1185,53
24	1045,77	968,66	1306,01	1233,72

25	1031,31	665,05	1050,59	1503,60
Keskiarvot	1055,0236	860,3268	1141,192	1327,4048

Erän 7874E F-FV ja V-O -arvot		
Kiekko	F-FV	V-O
1	115,66	-293,97
2	-130,12	-274,69
3	144,58	-549,39
4	-81,93	-761,44
5	-53,01	-24,09
6	-207,22	-144,58
7	38,55	-260,24
8	-72,29	-669,87
9	53,01	-785,53
10	-183,13	-120,48
11	62,65	-602,4
12	-187,95	-245,78
13	72,29	-751,8
14	-240,97	-554,21
15	-28,92	-766,25
16	-250,6	-72,29
17	-115,66	-279,51
18	-130,12	-814,45
19	-159,04	-72,28
20	-120,48	-799,99
21	-62,65	-732,52
22	-144,57	-756,62
23	-192,77	-240,96
24	-260,24	-265,06
25	-19,28	-838,55
Keskiarvot	-86,17	-467,08

Kiekon keskityksen muuttuminen, kun käsivarren liikkeitä hallinnoivia rotate- ja extend-arvoja muutetaan $\pm 500 \mu\text{m}$

Koe 1, erä 7874D, A- ja B-kammio, 2 kiekkoa/muutos/kammio

A- ja B-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveydet mittapisteissä F, V, FV ja O kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Reunajäämien leveydet mittapisteissä F, V, FV ja O kun rotate- ja extend-arvoja muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.					
Toimi	Kiekko	F	V	FV	O
Alkup.asetukset	1 (A-kammio)	891,56	949,39	1426,49	1291,55
	25 (B-kammio)	1021,67	1156,61	1238,54	1122,88
A-kammio: Rotate +500	2	828,91	1291,55	1426,49	910,83
	4	886,74	1257,82	1503,60	1026,49
B-kammio: Rotate +500	3	978,30	1378,30	1161,43	906,01
	5	992,76	1330,11	1195,17	973,48
A-kammio: Rotate -500	6	857,82	640,96	1359,02	1522,78
	8	915,65	675,51	1412,03	1561,43
B-kammio: Rotate -500	7	1060,23	780,71	1036,13	1416,85
	9	1031,31	742,16	1103,60	1421,67
A-kammio: Extend +500	10	1021,67	925,29	1113,24	1219,26
	12	987,94	1132,52	1209,62	1079,51
B-kammio: Extend +500	11	1257,82	1093,96	877,10	1084,32
	13	1228,90	1180,71	949,39	1060,23
A-kammio: Extend -500	14	718,06	1065,05	1730,10	1098,78
	16	780,71	915,65	1667,45	1248,18
B-kammio: Extend -500	15	853,00	1118,06	1320,47	1055,41
	17	910,83	759,17	1320,47	1455,40
A-kammio: alkup. asetukset	18	814,45	901,19	1407,21	1199,99
	20	867,46	978,30	1416,85	1156,61
B-kammio: alkup. asetukset	19	992,76	1002,40	1118,06	1166,25
	21	1079,51	1031,31	1084,32	1180,71

A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksien keskiarvot mittapisteissä F, V, FV ja O, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

A-kammio	Alkup. alussa	rotate +500	rotate -500	extend +500	extend -500	Alkup. lopussa
F	891,56	857,825	886,735	1004,805	749,385	840,955
V	949,39	1274,685	658,235	1028,905	990,35	939,75
FV	1426,49	1465,05	1385,525	1161,43	1698,78	1412,03

O	1291,55	968,66	1542,105	1149,385	1173,48	1178,3
---	---------	--------	----------	----------	---------	--------

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvot, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvot			
Toimi	Kiekko	F–FV	V–O
Alkup. asetukset	1	-534,93	-342,16
Rotate +500	2	-597,58	380,72
	4	-616,86	231,33
Rotate -500	6	-501,2	-881,82
	8	-496,38	-885,92
Extend +500	10	-91,57	-293,97
	12	-221,68	53,01
Extend -500	14	-1012,04	-33,73
	16	-886,74	-332,53
Alkup. asetukset	18	-592,76	-298,8
	20	-549,39	-178,31

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvojen keskiarvot, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvojen keskiarvot		
Toimi	F–FV	V–O
Alkup. alussa	-534,93	-342,16
rotate +500	-607,22	306,025
rotate -500	-498,79	-883,87
extend +500	-156,625	-120,48
extend -500	-949,39	-183,13
Alkup. lopussa	-571,075	-238,555

B-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksien keskiarvot mittapisteissä F, V, FV ja O, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

B-kammio	Alkup. alussa	rotate +500	rotate -500	extend +500	extend -500	Alkup. lopussa
F	1021,67	985,53	1045,77	1243,36	881,92	1036,135
V	1156,61	1354,21	761,435	1137,335	938,615	1016,86

FV	1238,54	1178,30	1069,87	913,25	1320,47	1101,19
O	1122,88	939,75	1419,26	1072,275	1255,41	1173,48

B-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvot, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

B-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvot			
Toimi	Kiekko	F-FV	V-O
Alkup aset.	25	-216,87	33,73
B: Rotate +500	3	-183,13	472,29
	5	-202,41	356,63
B: Rotate -500	7	24,1	-636,14
	9	-72,29	-679,51
B: Extend +500	11	380,72	9,64
	13	279,51	120,48
B: Extend -500	15	-467,47	62,65
	17	-409,64	-696,23
B: Alkup. asetukset	19	-125,3	-163,85
	21	-4,81	-149,4

B-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvojen keskiarvot, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

B-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvojen keskiarvot		
Toimi	F-FV	V-O
Alkup. alussa	-216,87	33,73
rotate +500	-192,77	414,46
rotate -500	-24,095	-657,825
extend +500	330,115	65,06
extend -500	-438,555	-316,79
Alkup. lopussa	-65,055	-156,625

Koe 2, erä 7874F, A-kammio, 5 kiekkoa/muutos

A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveydet mittapisteissä F, V, FV ja O kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Toimi	Kiekko	F	V	FV	O
Alkuperäisillä asetuksilla (26.11.2013)	1	1402,39	1267,46	1489,14	1412,03
	2	1002,4	1093,96	1445,77	1204,81
	3	1344,56	1199,99	1460,22	1426,49
	4	1016,86	1055,41	1455,4	1214,44
	5	1310,83	1175,89	1436,13	1392,75
Rotate +500	6	968,66	1431,31	1513,24	925,29
	7	1228,9	1469,86	1450,59	1122,88
	8	997,58	1431,31	1513,24	954,21
	9	1199,99	1498,78	1489,14	1113,24
	10	1007,22	1431,31	1489,14	959,03
Rotate -500	11	1137,34	833,73	1310,83	1532,51
	12	1045,77	809,63	1378,3	1508,42
	13	1146,97	795,17	1339,74	1595,16
	14	1065,05	751,8	1363,84	1614,44
	15	1175,89	771,08	1281,91	1595,16
Extend +500	16	1146,97	1026,49	1156,61	1204,81
	17	1224,08	1021,67	1132,52	1224,08
	18	1161,43	1026,49	1209,62	1243,36
	19	1277,09	1069,87	1103,6	1233,72
	20	1190,35	1060,23	1209,62	1219,26
Extend -500	21	973,48	1045,77	1696,37	1171,07
	22	963,84	1050,59	1773,47	1209,62
	23	1007,22	1079,51	1657,81	1204,81
	24	959,03	1026,49	1715,64	1199,99
	25	973,48	1065,05	1749,38	1195,17

A-kammiossa ajettujen kiekkojen reunajäämien leveyksien keskiarvot mittapisteissä F, V, FV ja O kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Keskiarvot	F	V	FV	O
alkup.	1215,408	1158,542	1457,332	1330,104
rotate +500	1080,47	1452,514	1491,07	1014,93
rotate -500	1114,204	792,282	1334,924	1569,138
extend +500	1199,984	1040,95	1162,394	1225,046
extend -500	975,41	1053,482	1718,534	1196,132

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvot, kun kiekkoa kuljettavan käsivarren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Toimi	Kiekko	F–FV (extend)	V–O (rotate)
Alkuperäisillä asetuksilla	1	-86,75	-144,57
	2	-443,37	-110,85
	3	-115,66	-226,5
	4	-438,54	-159,03
	5	-125,3	-216,86
Rotate +500	6	-544,58	506,02
	7	-221,69	346,98
	8	-515,66	477,1
	9	-289,15	385,54
	10	-481,92	472,28
Rotate -500	11	-173,49	-698,78
	12	-332,53	-698,79
	13	-192,77	-799,99
	14	-298,79	-862,64
	15	-106,02	-824,08
Extend +500	16	-9,64	-178,32
	17	91,56	-202,41
	18	-48,19	-216,87
	19	173,49	-163,85
	20	-19,27	-159,03
Extend -500	21	-722,89	-125,3
	22	-809,63	-159,03
	23	-650,59	-125,3
	24	-756,61	-173,5
	25	-775,9	-130,12

A-kammiossa ajettujen kiekkojen F–FV- ja V–O-arvojen keskiarvot, kun kiekkoa kuljettavan käsi-
varren liikkeitä muutettiin $\pm 500 \mu\text{m}$.

Keskiarvot	F–FV (extend)	V–O (rotate)
Alkup asetukset	-241,92	-171,56
Rotate +500	-410,60	437,58
Rotate -500	-220,72	-776,86
Extend +500	37,59	-184,10
Extend -500	-743,12	-142,65